

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№3 (356)

МАЙ-ИЮНЬ, 2024

ISSN 0044-3948

астрономия
геофизика
космонавтика



Эволюция галактик:
подарки окружения

Складки пространства-времени:
история поиска космических
струн во Вселенной

От Земли до Вселенной:
история определения
расстояний

ФИЛОСОФИЯ КОСМИЗМА И СТАНОВЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АСТРОБИОЛОГИИ



НАУКА

— 1727 —

ПОДПИШИТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»

печатные и электронные версии

В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ NAUKABOOKS.RU

- ⇒ Зайдите на сайт.
- ⇒ Выберите журнал.
- ⇒ Укажите контактные данные получателя.
- ⇒ Оплатите заказ онлайн.

Отдельные номера журналов можно купить
в магазине «Академкнига» по адресу:
г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1.



ПО E-MAIL И ТЕЛЕФОНУ

journals@naukapublishers.ru или +7(495) 276-77-35

Сообщите, на какие журналы вы хотите подписаться, а также
свои контактные данные. Менеджер поможет оформить подписку.

ЧЕРЕЗ ПОДПИСНЫЕ АГЕНТСТВА



Почта России podpiska.pochta.ru
Урал-Пресс ural-press.ru
Пресса России pressa-rf.ru
ПрессИнформ presskiosk.ru
Ивис ivis.ru НЭБ elibrary.ru

На странице журнала
размещена информация
о его стоимости и условиях
доставки

Обязательно проверьте,
что правильно указали
контактные данные
получателя

ЗЕМЛЯ И ВСЕЛЕННАЯ

№3 (357)
МАЙ-ИЮНЬ, 2024

ISSN 0044-3948

астрономия
геофизика
космонавтика

Научно-популярный журнал
Российской академии наук
Издается под руководством
Президиума РАН
Выходит с января 1965 года
6 раз в год
«Наука»
Москва



Лауреат Беляевской премии
2023 г.

В НОМЕРЕ:

Колонка главного редактора	3
СИЛЬЧЕНКО О.К. Эволюция галактик: подарки окружения	6
САЖИНА О.С. Складки пространства-времени: история поиска космических струн во Вселенной	16
ЦВЕТКОВ А.С. От Земли до Вселенной: история определения расстояний	29

История науки

КОЦЮРБЕНКО О.Р., ГОВОРОВА А.Ф. Философия космизма и становление российской астробиологии	49
--	----

Проблемы космонавтики

ИПАТОВ А.В., ВЕДЕШИН Л.А., ГЕРАСЮТИН С.А. Мониторинг космического мусора и перспективы освоения околоземного космического пространства (окончание)	75
---	----

Обсерватории, институты

СОЛОМОНОВ Ю.В., ГЕРАСЮТИН С.А. «Второй телескоп Америки»	85
---	----

Гипотезы, дискуссии, предложения

СОЛОВЬЁВ А.А. О прогнозе экстремальных событий в природе и обществе	99
--	----

Коротко и интересно

Китай и Франция запустили обсерваторию для наблюдения за гамма-всплесками	119
<i>VepiColombo</i> во время четвертого гравитационного маневра сфотографировал Меркурий на близком расстоянии	121
Table of Content	123

На обложке:

Галактика M106 (NGC4258)
в созвездии Гончие Псы. См. с. 7.
Изображение: NASA/ESA

© Российская академия наук, 2024
© Редакция журнала «Земля и Вселенная» (составитель), 2024
© ФГБУ «Издательство «Наука», 2024

Редакционная коллегия:

главный редактор
академик Л.М. ЗЕЛЕНЬИЙ,
летчик-космонавт
П.В. ВИНОГРАДОВ,
зам. главного редактора
кандидат филолог. наук
О.В. ЗАКУТНЯЯ,
доктор исторических наук
К.В. ИВАНОВ,
летчик-космонавт
А.Ю. КАЛЕРИ,
кандидат физ.-мат. наук
О.Ю. ЛАВРОВА,
член-корр. РАН
А.А. ЛУТОВИНОВ,
зам. главного редактора
доктор физ.-мат. наук
О.Ю. МАЛКОВ,
доктор физ.-мат. наук
И.Г. МИТРОФАНОВ,
академик И.И. МОХОВ,
член-корр. РАН
И.Д. НОВИКОВ,
член-корр. РАН
К.А. ПОСТНОВ,
доктор физ.-мат. наук
М.В. РОДКИН,
научный директор
Московского планетария
Ф.Б. РУБЛЕВА,
член-корр. РАН
А.Л. СОБИСЕВИЧ,
член-корр. РАН
О.Н. СОЛОМИНА,
академик В.А. СОЛОВЬЕВ,
академик
А.М. ЧЕРЕПАЩУК,
доктор физ.-мат. наук
В.В. ШЕВЧЕНКО,
член-корр. РАН
Б.М. ШУСТОВ

Editorial Board:

Editor-in-chief
Acad. Dr. Lev M. ZELENYI
Acad. Dr. Anatoly M. CHEREPASCHUK
Dr. Konstantin V. IVANOV
Pilot-cosmonaut Alexander Yu. KALERI
Dr. Olga Yu. LAVROVA
RAS Corr. Member Dr. Alexander A. LUTOVINOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Oleg Yu. MALKOV
Dr. Igor G. MITROFANOV
Acad. Dr. Igor I. MOKHOV
RAS Corr. Member Dr. Igor D. NOVIKOV
RAS Corr. Member Dr. Konstantin A. POSTNOV
Dr. Mikhail V. RODKIN
Faina B. RUBLEVA
Dr. Vladislav V. SHEVCHENKO
RAS Corr. Member Dr. Boris M. SHUSTOV
RAS Corr. Member Dr. Alexey L. SOBISEVICH
RAS Corr. Member Dr. Olga N. SOLOMINA
RAS Corr. Member Dr. Vladimir A. SOLOVYEV
Pilot-cosmonaut Pavel V. VINOGRADOV
Deputy Editor-in-chief
Dr. Olga V. ZAKUTNYAYA

Колонка главного редактора

Дорогие читатели, коллеги, друзья!

В этой колонке я хочу поговорить о научном космосе и, прежде всего, поделиться с вами впечатлениями от 45-ой Ассамблеи Международного комитета по космическим исследованиям (КОСПАР) – главного международного форума космической науки, который проходит раз в два года последовательно в разных странах и на разных континентах.

Сам КОСПАР был создан по инициативе и в структуре Международного совета научных союзов (International Council of Scientific Unions, позже переименован в Международный совет по науке, International Council for Science с прежней аббревиатурой ICSU) в 1958 г. – в самом начале великой космической эпохи как место, где могли беспрепятственно встречаться обычно засекреченные советские и американские ученые – тогдашние лидеры космических исследований.

Надо сказать, что все прошедшие десятилетия КОСПАР прекрасно справлялся с этой ролью – площадки, свободной от политики, где ученые встречаются, спорят, иногда даже ругаются, – но всегда только по чисто научным проблемам. Наверное, понятно, как важна эта объективная, взвешенная позиция КОСПАР в наше сложное время.

Последнее десятилетие оказалось очень непростым и для самого КОСПАР. После блестящей (и, как многие считают, лучшей в истории КОСПАР) 40-й Ассамблеи, проведенной в Москве в 2014 г., началась полоса неудач. Ассамблея 2016 г. в Стамбуле была отменена из-за попытки государственного переворота в стране. Ас-



Фотография: Т.Д. Жаркова, ИКИ РАН

самблея 2020 г. в Сиднее попала на пик ковида и была довольно неуклюже проведена в онлайн-формате.

После этих событий тем более приятно, что Ассамблея в Пусане – большом портовом южнокорейском городе – прошла, без преувеличения, блестяще. Этому способствовало много факторов, и прежде всего то обстоятельство, что южнокорейская космическая наука находится на подъеме. Успехи микроэлектроники, известные нам по популярным брендам Samsung, LG, KIA, материализовались в самых разных направлениях исследований дальнего и ближнего космоса.

Я был впечатлен, в частности, успехами южнокорейской лунной орбитальной экспедиции *Danuri*, запущенной четыре года назад в августе 2022 г. Она дала ряд интересных результатов, о которых мы расскажем в дальнейшем. А в общем рейтинге лунных программ различных стран Корея сейчас уверенно выходит на четвертое-пятое места, за которые России ещё предстоит побороться, вовремя и успешно запустив наши экспедиции «Луна-26» и «Луна-27».

Второй фактор успеха Ассамблеи – это один из лучших в мире конгресс-



Выставочный и Конгресс-центр в Пусане, Южная Корея (Busan Exhibition & Convention Center, BEXCO). Фотография: Wikipedia/Michiel1972

центров BEXCO (Busan Exhibition & Convention Center). Как мы мечтали о таком центре, готовясь к проведению Ассамблеи в Москве! И такое строительство планировалось, но финансовый кризис 2008 г. разрушил все планы.

В Ассамблее 2024 г. участвовало более 3000 человек. Десятки сессий, круглых столов и форумов проходили одновременно, и для меня самой трудной задачей было успеть на все главные плазменные, лунные и планетные мероприятия.

Несомненно, что лунная экспансия, о неизбежности которой мы говорили столько лет, уже началась, и 2024 год стал рубежным. Здесь и посадки американских коммерческих аппаратов (в основном пока не очень удачные), и работы японского зонда «в перевернутом состоянии», и главное достижение китайских коллег – недавняя доставка лунного грунта с обратной стороны Луны в миссии «Чанъэ-6». Меньше года прошло после посадки в приполярной области индийского аппарата «Чандраяан-3», а лунные сессии были уже заполнены содержательными докладами о его результатах.

Наш коллега Анил Бхардваи (Anil Bhardwaj), директор лаборатории физических исследований в Космическом центре в Ахмедабаде, Индия, с которым мы в прошлом году договорились об обмене данными индийских и российских посадочных экспедиций, заслуженно получил одну из высших наград КОСПАР за достижения в лунных исследованиях.

Конечно, было грустно чувствовать себя несколько «чужими на этом празднике жизни». Но на планетных сессиях, особенно марсианских и венерианских, российская наука была представлена весьма достойно. Серия докладов

специалистов отдела физики планет ИКИ РАН, основанных на данных миссии «ЭкзоМарс-2016», была встречена с большим интересом и энтузиазмом.

На сессии, посвященной Венере, обсуждалась координация работ международной флотилии космических аппаратов, которые отправятся к этой планете в начале 2030-х гг. Большую заинтересованность планетных коллег вызвал наш доклад о российском проекте «Венера-Д». В длинном списке мощных американских, европейских, индийских экспедиций к Венере наша экспедиция занимает особое и даже уникальное место, поскольку мы планируем проводить измерения и в облачном слое, и на поверхности.

Я не смог, к своему большому сожалению, присутствовать на параллельно проходящих астрофизических и космологических заседаниях, но знаю, что доклады о результатах российского проекта «Спектр-РГ» прошли более чем успешно. В июле этого года исполнилось пять лет запуску этой замечательной обсерватории, и несмотря на все сложности, она работает просто блестяще – здесь нам есть, чем гордиться. К сожалению, уже третий год

в «спящем» режиме находится германский телескоп eROSITA – один из двух телескопов обсерватории (второй – наш, российский ART-XC им. М.Н. Павлинского). Все коллеги-астрофизики, с которыми я встречался в Пусане, подчеркивали, что очень ждут, когда немецкий телескоп сможет возобновить свою работу, прерванную в 2022 г.

В завершение же хочу поделиться очень важным для меня событием. Недавно, в начале апреля этого года, в преддверии юбилейных торжеств в честь 300-летия Российской академии науки мне была присуждена Премия РАН имени К.Э. Циолковского за цикл работ, посвященный подготовке и реализации проектов Федеральной космической программы 1995–2023 гг. в области фундаментальных космических исследований.

Именная премия имени К.Э. Циолковского Российской академии наук присуждается с 1999 г. «за выдающиеся работы в области межпланетных сообщений и использования космического пространства». Ее удостоились такие выдающиеся деятели ракетно-космической отрасли, как Б.В. Раушенбах, Э.Л. Аким, В.П. Легостаев, В.Я. Нейланд, В.А. Соловьев. Для меня большая честь получить эту награду, тем более, что она носит имя основоположника мировой космонавтики. В своей короткой статье в «Вестнике РАН», опубликованной по случаю вручения, я высказал очень важную для меня мысль о том, что развитие научной идеи проходит через три этапа:



Президент Российской академии наук Г.Я. Красников на праздновании 5-летия запуска российской космической обсерватории «Спектр-РГ» в ИКИ РАН 26 июля 2024 г. Фотография: Т.Д. Жаркова, ИКИ РАН

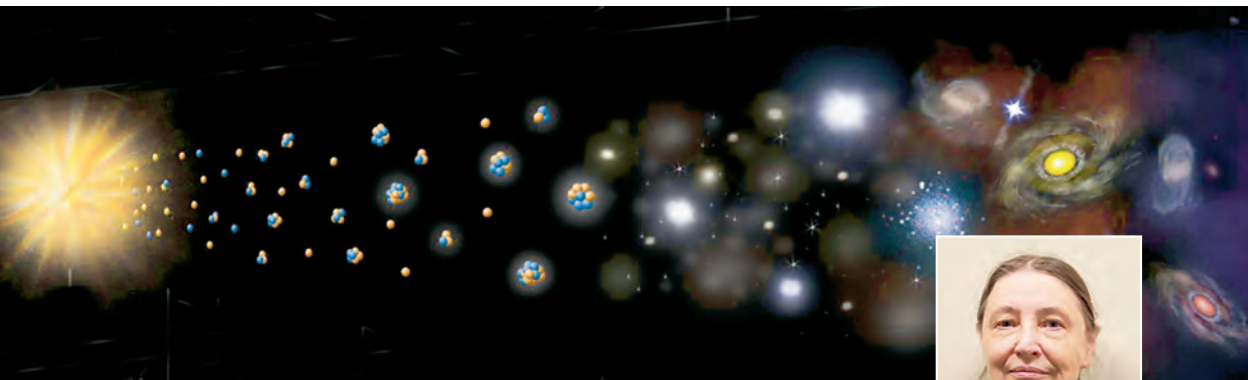


Академики Л.М. Зеленый и Г.Я. Красников. Вручение именной премии имени К.Э. Циолковского в Президиуме РАН 9 апреля 2024 г. Источник: РАН

мечта – научный расчёт – воплощение. И самое важное, что каждый последующий не отменяет предыдущие: даже когда мы строим космические аппараты для исследования космоса, мы не перестаем мечтать о том, что будет дальше.

Главный редактор
журнала «Земля и Вселенная»
академик Лев Матвеевич Зелёный

ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК: ПОДАРКИ ОКРУЖЕНИЯ



СИЛЬЧЕНКО Ольга Касьяновна,

доктор физико-математических наук

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ

DOI: 10.7868/50044394824030010



Галактики – огромные звездно-газовые системы, основное видимое «население» Вселенной – бывают очень разные по форме (форму галактик называют морфологией), а также по размерам, по массам, по цвету... Много видимых характеристик есть у галактик, и все они изменяются в интервалах многих порядков величины даже в самой небольшой области Вселенной, которую мы в деталях наблюдаем вокруг нас¹. Из самых общих соображений, кажется, что все эти характеристики должны изменяться и у одной конкретной галактики тоже в течение ее жизни – это называется эволюцией. Эволюцию можно не только пред-

полагать, – ее можно наблюдать, «подглядывая» за галактиками на разных красных смещениях²: из-за конечности скорости света, чем дальше от нас наблюдаемая галактика, тем больше промежуток времени между ее наблюдаемым этапом эволюции и сегодняшним моментом, когда мы регистрируем пришедший от галактики свет. В принципе, сейчас на крупных телескопах наблюдаются такие далекие галактики, что у них от их рождения до наблюдаемого этапа эволюции прошло

¹ Шустов Б.М. Галактика: прошлое, настоящее, будущее // Земля и Вселенная. 2000. № 3; Сильченко О.К. Эволюция центральных областей галактик // Земля и Вселенная. 2005. № 1; Ревнивцев М.Г. Рентгеновский «хребет» Галактики // Земля и Вселенная. 2007. № 6.

² Красное смещение – явление, при котором длина волны электромагнитного излучения для наблюдателя увеличивается относительно испущенной источником излучения длины волны. Оно может быть доплеровским, гравитационным и космологическим, несмотря на разную природу, внешне проявляется одинаково. Установлено, что галактики ускоренно разбегаются, а Вселенная постоянно расширяется. Красное смещение считается одним из главных доказательств теории Большого взрыва.

максимум всего полмиллиарда лет – при том, что современный возраст расширения Вселенной 13.8 млрд лет. Поэтому наблюдения галактик на разных красных смещениях, от 0 до 10 в современную эпоху, – это способ выстроить наблюдаемую цепочку этапов эволюции галактик. Чем и занимаются астрономы, изучающие галактики.

КАК РАСТЕТ РАЗМЕР ГАЛАКТИКИ?

У разных галактик это происходит по-разному. Галактики бывают эллиптические и дисковые. Как правило, современные большие эллиптические галактики уже не формируют новые звезды – все свое звездное население или популяцию³ они сформировали больше 10 млрд лет назад. А вот галактики дисковые, большинство среди которых составляют спиральные галактики, продолжают рождать новые звезды из газа в своих дисках. Причем со временем это звездообразование смещается от центра наружу – сначала формируются звезды внутреннего диска, а потом этот диск все надстраивается и надстраивается на больших расстояниях от центра галактики. Казалось бы, спиральные галактики должны быстрее увеличиваться в размерах, чем эллиптические. Но нет! Наблюдения массивных галактик на красном смещении $z = 2$ – что соответствует прошедшей 10 млрд лет назад эпохе – показали, что в среднем гигантские эллиптические галактики увеличили свой размер за последние 10 млрд лет в 5 раз, дисковые – всего в 3. И если с механизмом увеличения размера галактических дисков все понятно – они растут за счет появления новых звезд во внешних областях



IC2006 в созвездии Эридана:
пример гигантской эллиптической
галактики размером 35 тыс. св. лет
(находится от нас на расстоянии
60–70 млн св. лет). NASA/ESA

диска (у спиральных галактик пропорционально растут размер и масса), то с галактиками эллиптическими, в которых звезды последние 10 млрд лет не образовывались, причина роста их размера совсем не ясна. Быстрый рост размера эллиптической галактики не сопровождается быстрым ростом ее звездной массы – что, с одной стороны, естественно, поскольку новые звезды не добавляются в галактику, а с другой стороны, ставит вопрос: за счет чего же



M106 (NGC4258) в созвездии Гонимые Псы:
пример гигантской спиральной галактики
размером 135 тыс. св. лет (находится
от нас на расстоянии 23.7 млн св. лет).
NASA/ESA

³ Различные типы звезд в составе галактик.

так быстро растет размер? Нужно было подобрать такой динамический механизм – придумать такое событие в жизни галактики, чтобы размер звездной системы вырос сильнее, чем масса (на самом деле наблюдения показывают, что размер растет как квадрат массы). И при этом сохранилась сферoidalная форма.

Специалисты быстро придумали, что должно было произойти: на компактную затравку огромной звездной массы, между прочим, в сто миллиардов солнечных масс (!), должны упасть за 10 млрд лет эволюции галактики 10 маломассивных ее спутников, каждый примерно в 10 раз меньше, чем большая галактика. При этом ни в одном спутнике не должно быть газа – только звезды; ведь если на большую галактику упадет газ, из этого газа в ней тут же начнут образовываться новые звезды, и тогда галактика уже не будет больше «спокойной эллиптической» системой. Если спутник до падения вращался по протяженной вытянутой орбите вокруг

большой галактики, то он принесет газ «с моментом», и вокруг ранее эллиптической галактики выстроится протяженный вращающийся диск...

ЧТО С МОМЕНТОМ ВРАЩЕНИЯ – ЕСТЬ ЛИ ОН У ГАЛАКТИК С САМОГО НАЧАЛА, И КАК ОН РАСТЕТ?

Нобелевский лауреат канадско-американский физик-космолог Джим Пибблз еще в 1960-х гг. объяснил всем интересующимся, что момент вращения – произведение скорости вращения на массу и на размер галактики – должен присутствовать изначально у галактик еще на заре их формирования. Потому что галактики формируются не в изоляции (они не «сферический конь в вакууме»), а в тесном окружении других таких же вновь собравшихся галактик. Одна галактика пролетит мимо другой, потянет ближайший «бок» со звездами соседки своей гравитацией,

Современный сценарий эволюции гигантской эллиптической галактики от Большого взрыва вверху до настоящего состояния через 13.7 млрд лет



и раскрутит ее приливным воздействием. Так орбитальный момент превращается во внутренний – в момент вращения. Все дисковые галактики вращаются и совершают обороты довольно быстро. Практически вся кинетическая энергия звезд, – а она в равновесной галактике соответствует потенциальной энергии, создаваемой собственной гравитацией галактики, – в дисковых галактиках заключена в упорядоченном вращении звезд (и газа) по кругу вокруг центра галактики, где располагается центр потенциальной «ямы»⁴. Скорость вращения галактики, вернее, ее момент – это ее третья важнейшая фундаментальная характеристика после массы и размера. И хотя значительный момент галактика приобретает еще в момент первой «сборки», потом этот момент далее растет и увеличивается очень значительно именно у спиральных галактик. Итальянский астроном Альвиро Ренцини прикинул, перемножив наблюдаемые темпы роста массы, размера и скорости вращения галактики типа Млечный Путь, что за последние 8 млрд лет ее момент должен вырасти в 20–50 раз!

И опять встает вопрос: за счет чего может так сильно вырасти момент? Снова приходится смотреть на окружение галактики: только оттуда может быть принесен лишний орбитальный момент, который внутри галактики превратится в ее собственный момент вращения. Но теперь уже, поскольку речь идет об эволюции спиральных галактик, у которых есть и другие

«потребности», кроме раскрутки, хочется совместить приятное с полезным и принести этот момент в диск галактики с газовой струей. Тогда не только будет принесен момент, но также будет принесен и материал для последующего звездообразования. Так можно одновременно и подпитывать формирование новых звезд, и «смещать» этот процесс на периферию галактики, на большие радиусы, – поскольку момент пропорционален радиусу.

АККРЕЦИЯ⁵ ХОЛОДНОГО ГАЗА ИЗВНЕ – ЭТО НАШЕ ВСЁ ДЛЯ ЭВОЛЮЦИИ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК...

На самом деле, у спиральных галактик, и в первую очередь у Млечного Пути, который изучен лучше других, есть много удивительных особенностей, которые невозможно объяснить без предположения о постоянном притоке извне холодного, бедного металлами газа. Например, посмотрим на эволюцию еще одного важнейшего свойства звездного населения Млечного Пути – его химического состава. Химическую эволюцию галактик астрономы представляют себе вполне определенно: звезды горят, в их недрах идут термоядерные реакции (горение водорода и гелия), в результате которых рождаются новые химические элементы, которые после смерти звезды выбрасываются в межзвездный газ и потом, в процессе звездообразования, входят в состав следующих поколений звезд. То есть, согласно логике, если в галактике все время идет звездообразование, появляются

⁴ Гравитационное поле галактики демонстрирует максимальную силу в центре галактики. Поскольку потенциальная энергия гравитационного поля отрицательная, «место силы» соответствует максимальному в абсолютных единицах потенциалу, но минимальному, если учесть, что величины этого потенциала – отрицательные. Поэтому для центров гравитирующих космических объектов устоялся термин «потенциальная яма» – это место, откуда труднее всего выбраться.

⁵ В астрофизике аккреция – это натекание материи в массивный объект за счет гравитационного притяжения большего количества вещества (обычно газообразного), в аккреционный диск. Большинство астрономических объектов, таких как галактики, звезды и планеты, образуются в результате процессов аккреции.

новые звезды, они в свою очередь производят новые тяжелые элементы, которые выбрасываются в межзвездную среду и в последующем участвуют в звездообразовании... Со временем средняя металличность⁶ звезд и газа в диске галактики должна монотонно возрастать. А в диске Млечного Пути она не растет! Последние 8 млрд лет средняя металличность звезд остается постоянной: сегодня рождаются звезды с металличностью Солнца, которое родилось 4.5 млрд лет назад, тогда оно получило типичную для тех времен солнечную металличность. Даже старое рассеянное скопление NGC6791 в созвездии Лиры, находящееся от нас в 6918.31 пк, которому то ли 8, то ли 9 млрд лет, тоже имеет солнечную металличность (а может быть даже чуть выше...).

Астрономы давно придумали, как разрешить этот «парадокс G-карликов» (названный так потому, что среди G-карликов, с их массой в одну солнечную, встречаются звезды всех возрастов). Нужно постоянно добавлять в диск Млечного Пути газ с низкой, а лучше нулевой металличностью. Тогда этот добавленный газ будет перемешиваться с газом, выброшенным умирающими звездами и обогащенным новыми тяжелыми элементами, «разбавлять» его, и металличность газа будет в среднем оставаться на постоянном уровне. Как и металличность формирующихся из этого газа звезд.

Второй весомый аргумент в пользу постоянной аккреции (добавления, натекания) холодного газа извне в диски спиральных галактик появился после того, как у многих галактик ближайшей Вселенной измерили одновременно и содержание газа в дисках, и темпы его превращения в молодые звезды.

⁶ Относительная концентрация элементов тяжелее водорода и гелия в звездах.

Поделив одно на другое, астрономы с удивлением обнаружили, что во всех близких спиральных галактиках время исчерпания газа на формирование молодых звезд – 2 млрд лет, независимо от массы галактики и количества газа в ней, от ее темпа звездообразования... При этом, если мы ориентируемся на свойства Млечного Пути, то возраст звездных дисков не меньше 8 млрд лет, и все это время в них идет звездообразование с примерно постоянной скоростью. Неужели нам так не повезло, что мы живем в эпоху, когда звездообразование вокруг повсеместно готово вот-вот прекратиться? Астрономы не любят «выделенных моментов».

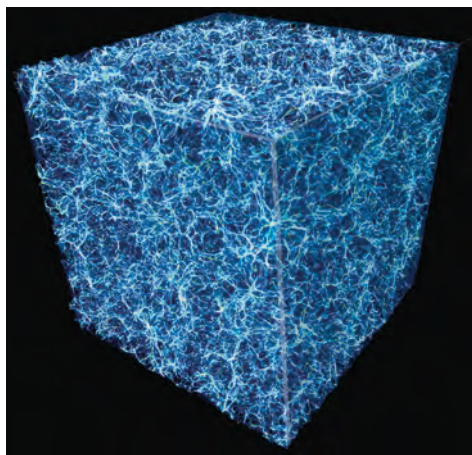
Гораздо более естественной представляется гипотеза, что запасы газа в дисках все время пополняются за счет притекания холодного газа извне. И уж совсем красивым для эстетствующих теоретиков является «равновесный сценарий»: сколько газа притекает в галактику извне в единицу времени, столько и расходуется на звездообразование, за исключением малой доли выброшенного из галактики в «галактических фонтанах» газа. «Фонтаны» создаются газом, нагретым молодыми звездами до такой степени, что он в состоянии преодолеть гравитацию галактики и уйти в межгалактическое пространство. Где он потом «остынет» и, возможно, захочет вернуться обратно в родную галактику...

ИСТОЧНИКИ АККРЕЦИИ ВНЕШНЕГО ГАЗА – ЧТО ЭТО ТАКОЕ?

И тут мы приходим к краеугольному вопросу современной внегалактической астрономии: откуда берется этот внешний газ, который миллиардами лет течет на галактику и питает всю ее эволюцию? Космологи-теоре-

тики имеют что сказать по этому вопросу. Во-первых, газа и звезд, которые реально наблюдаются в реальных галактиках, слишком мало по мерке космологической модели эволюции Вселенной – так называемых «барионов» должно быть больше раз в пять, чтобы удовлетворить описанию эволюции Вселенной как целого. Из этого следует вывод, что газ *вне* галактик должен быть, и его должно быть много. Во-вторых, есть расчеты эволюции крупномасштабной структуры Вселенной, которые коротко и качественно можно описать так: сначала темная материя была равномерно размазана по всей Вселенной, потом она под действием собственной гравитации делилась на комки, которые, в свою очередь, притягивались друг к другу и сливались и формировали все более крупные комки... В конце концов формируется очень сложная сетка из скоплений – узлов, соединенных «веревочками» (по-английски, филаментами). И поскольку большая часть гравитирующей массы скапливается в узлах, темная и барионная материя текут в сторону этих узлов вдоль филаментов. Барионы, поскольку их по плотности в пять-шесть раз меньше темной материи, должны следовать за темной материей в ходе ее фрагментации и сборки в комки под действием ее же собственной гравитации, – то есть барионы тоже будут скапливаться в ниточках между скоплениями, и по этим ниточкам натекают на галактики. Таким образом, внешний газ, еще не участвовавший в формировании звезд в галактиках, газ из первоначальных «космологических» запасов, натекает на галактики, расположенные в узлах крупномасштабной структуры, – аккрецирует.

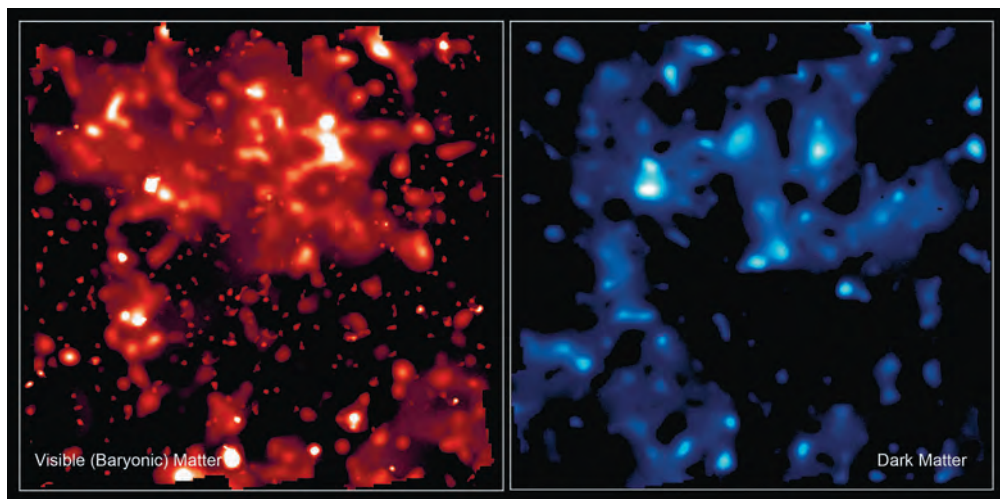
Предложенный космологами механизм постоянного снабжения галактик извне холодным и бедным металлами газом через присоединенные



Вот так после 14 млрд лет выглядит крупномасштабная структура Вселенной в компьютере в результате концентрации темной материи под действием гравитации. NASA/ESA

филаменты – очень симпатичен астрономам. Осталось только найти его наблюдательные проявления, но с этим пока проблема. Есть только косвенные свидетельства. Например, изучение химического состава межгалактического газа по спектрам далеких квазаров на просвет – то есть по линиям, которые «выедает» межгалактический газ ближней Вселенной в спектре луча от квазара дальнего фона. Получается, что вблизи большой оси изофот⁷ галактических дисков, вблизи их линий узлов, в межгалактическом газе мало металлов, а вблизи малой оси – перпендикулярно плоскости диска – их много. Объяснение этому наблюдательному различию предлагается такое: газ филаментов, первичный и бедный металлами, натекает в плоскости диска, потом в диске участвует в звездообразовании, получает от молодых звезд новые тяжелые элементы, греется и – уходит из диска в направлении

⁷ Кривая на освещенной поверхности, соединяющая точки с одинаковой яркостью.



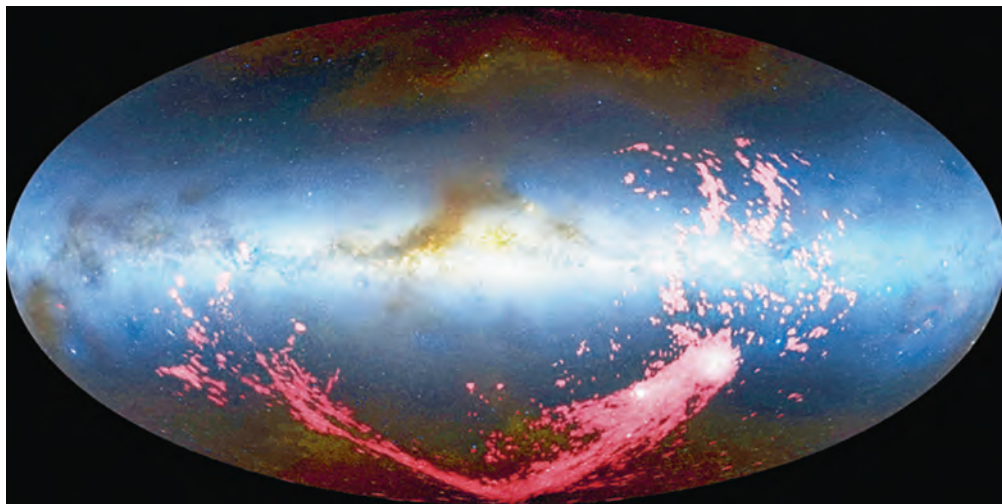
А вот так распределение видимой (слева) и темной (справа) материи выглядит в наблюдениях, охвативших поле неба размером 2 угловых градуса в обзоре COSMOS. Scoville N. et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2007. Vol. 172. P. 1–8. NASA/ESA

наименьшего сопротивления, т. е. перпендикулярно плоскости диска. То есть этот газ над плоскостью диска – вторичный, уже прошедший через звезды, в отличие от газа в плоскости, на подходе к диску, который еще никогда не входил в звезды, а достался нам прямо от Большого взрыва. Есть в этой красивой гипотезе только один недостаток: чтобы тонкий диск спиральной галактики мог в течение 8 млрд лет насобирать нужный момент вращения и спокойно формировать дальше новые звезды – вот так, как наблюдается в Млечном Пути, – космологический филамент должен все это время подходить к диску с одной стороны и все время лежать строго в плоскости диска. Между тем, космологические модели в компьютерных расчетах ведут себя очень «бурно»: там к диску подключается то один, то другой филамент, и направление прихода первичного газа меняется несколько раз в течение миллиарда лет. То ли этот механизм не работает в действительности, то ли что-то надо кардинально менять в моделях...

ЕСТЬ И ДРУГИЕ ВАРИАНТЫ!

Наблюдая за жизнью галактик в ближней Вселенной, можно предложить и другие источники внешнего топлива для звездообразования. Это могут быть малые спутники большой спиральной галактики! Когда они невзначай подходят слишком близко к большой «хозяйке», она может их «огрбить» и своей гравитацией вытянуть у них газ. Известно, что все карликовые сфероидальные спутники, что у Млечного Пути, что у Туманности Андромеды, лишены газа. Может быть, они уже были «огрблены» пару-тройку миллиардов лет назад? А вот Магеллановы Облака⁸ пока приближаются к Млечному Пути только первый раз, и у них еще очень много газа. В радиолинии излучения нейтрального холодного водорода, на длине волны 21 см, на-

⁸ Большое находится на расстоянии 160 тыс. св. лет от нашей галактики и содержит около 30 млрд звезд, а Малое – в 200 тыс. св. лет и содержит около 3 млрд звезд.



Диск Млечного Пути «с ребра». Весь Магелланов Поток, нарисованный красным в форме дуги (внизу Галактики), в данный момент падает сверху и снизу на диск Млечного Пути.

NASA/ESA

прямую видно, как Магеллановы Облака уже начали отдавать свой газ Млечному Пути через так называемый Магелланов Поток⁹ – поток вдоль этих струй достигает нескольких масс Солнца в год и может подпитывать значительную долю текущего звездообразования в диске!

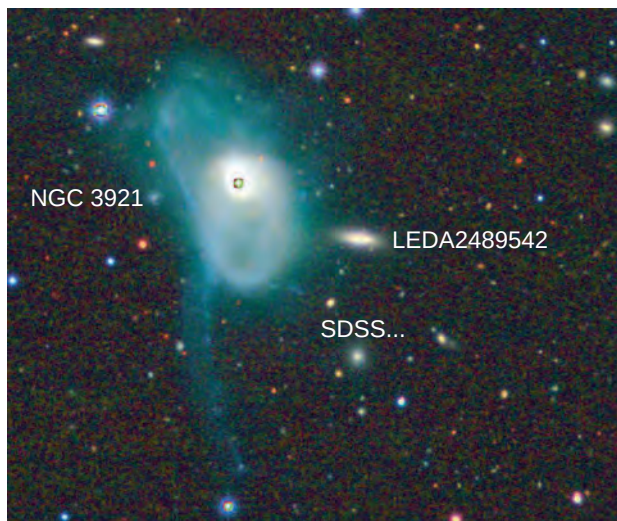
Системы спутников как источник внешнего газа для дисков спиральных галактик хороши еще и потому, что, как показывают наблюдения близких систем – таковых у Млечного Пути, у Туманности Андромеды, у гигантской эллиптической галактики CenA (NGC5128, или Caldwell 77) в созвездии Центавр, – все спутники одной большой галактики концентрируются к единой плоскости (полярной по отношению к диску

галактики у Млечного Пути и у Туманности Андромеды) и вращаются вокруг «хозяйской» галактики, оставаясь в этой плоскости. Следовательно, выпадая на диск большой галактики один за другим, они могут в течение многих миллиардов лет приносить большой галактике орбитальный момент с одинаково ориентированным спином¹⁰. Следовательно, именно системы спутников могут обеспечить наблюдаемый крутой эволюционный рост момента вращения у больших спиральных галактик!

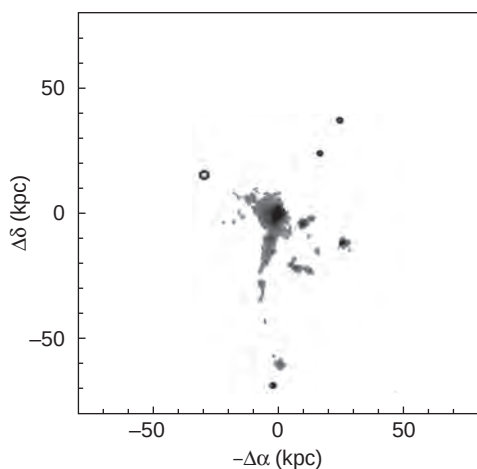
При этом возможны варианты: спутник может целиком свалиться на большую галактику – и тогда последствия будут комплексные и катастрофические. Упавший спутник принесет с собой дополнительный газ и дополнительные звезды, но также и возмутит тонкий диск хозяйской галактики, «разогреет его», звездный диск станет толстым, динамически упругим, и тогда в нем уже не сможет поддерживаться

⁹ Полоса межзвездных облаков нейтрального водорода в галактическом гало с видимыми размерами $\sim 100^\circ \times 10^\circ$,двигающихся со скоростью до 450 км/с, протянувшаяся от области Малого Магелланова Облака и Магелланова Моста к Южному полюсу нашей галактики. Общая масса Магелланова Потока оценивается приблизительно в 2×10^8 солнечных масс.

¹⁰ Направление оси вращения.



Вокруг линзовидной галактики UGC1020 в созвездии Кит газ течет между двумя галактиками – спутником (справа внизу) и большой галактикой (вверху). А вот направление, куда течет газ, на большую галактику или на маленькую, или на обе сразу – пока непонятно. Справа – эта же галактика в линии H_{α} . Координаты – расстояния в килопарсеках в секунду дуги от большой галактики. Sil'chenko O. et al. // *Galaxies*. 2023. Vol. 11, № 6. ArticleId 119



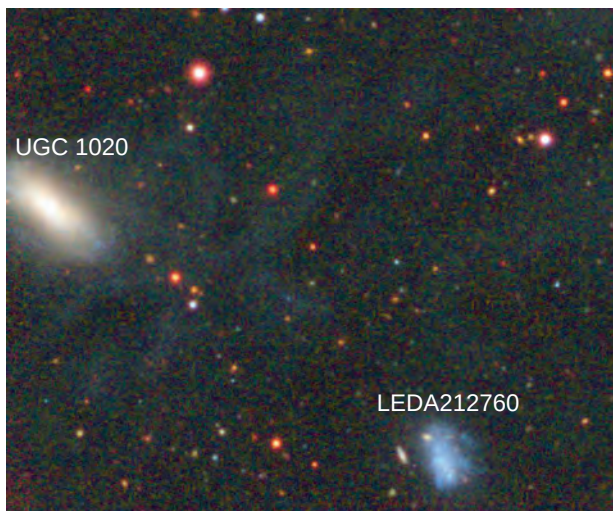
спиральная структура галактики; зато балдж¹¹ увеличится за счет «подкормки» новыми звездами. Тогда спиральная галактика превратится в линзо-

¹¹ Балдж (bulge – выпуклость, вздутие) – это центральное сгущение звезд сфероидальной формы в галактике, один из двух основных ее структурных компонентов наряду с диском. Основное структурное отличие балджа от диска заключается в его форме: диск – плоский и относительно тонкий, балдж – толстый. Это связано с тем, что звезды в диске движутся организовано, вращаются в одной плоскости и в одном направлении, а в балдже движение звезд хаотичнее.

видную. А вот если спутник не упадет, а только отдаст под действием гравитационного прилива свою газовую компоненту, и отдаст ее в своей орбитальной плоскости, и если его орбитальная плоскость будет совпадать с плоскостью диска большой галактики – тогда спиральная галактика останется таковой и просто получит дополнительный газ для своего звездообразования.

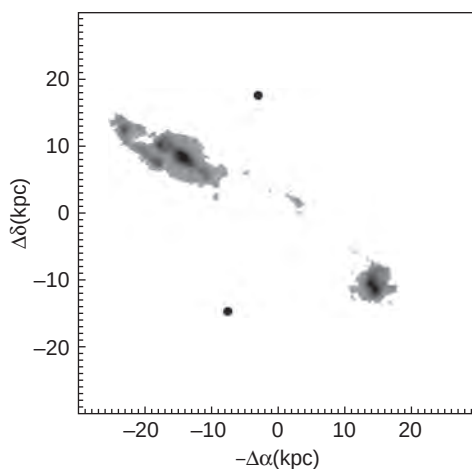
Астрономы, изучая системы взаимодействующих галактик в эмиссионных линиях ионизованного газа, видят напрямую перетекание чисто газовой компоненты между галактиками, близко расположенными друг к другу, или подошедшими близко друг к другу в процессе обращения вокруг общего центра тяжести. Вот несколько красивых случаев тесных систем галактик, где мы наблюдаем газовые потоки между галактиками: с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо 6-метрового телескопа БТА СО РАН. Панорамная спектроскопия со сканирующим интерферометром позволяет составить карты не только интенсивности излучения ионизованного газа, но и лучевых скоростей газа в каждой точке площадки, что позволяет проверить, какой галактике изначально

На большую линзовидную галактику NGC3921 в созвездии Большой Медведицы (снимок слева взят из публичного архива глубоких изображений неба Legacy Survey) газ течет с двух ее спутников справа на картинках; она в свою очередь выбрасывает приливной «хвост» и формирует на его конце «приливной карлик» – новую карликовую галактику. Справа – эта же галактика в линии H_{α} . Координаты – расстояния в килопарсеках в секунду дуги от большой галактики. Sil'chenko O. et al. // *Galaxies*. 2023. Vol. 11, № 6. ArticleId 119



принадлежал газ и в какую сторону он течет. Иногда мы точно понимаем: большая галактика «ободрала» спутники своей гравитацией (как, например, линзовидная NGC3921 в созвездии Большой Медведицы). Но бывают случаи, когда газ может с равной вероятностью принадлежать изначально любой из галактик. А может истекать из большого газового диска вокруг обеих галактик, и тогда галактики в паре, например, спиральная UGC1020 и ее спутник в созвездии Рыб, имеют равную возможность подпитываться газом из этого общего большого газового диска.

Можно заключить, что если дисковые галактики всю жизнь плавно аккрецируют холодный первичный газ извне, это позволяет решить многие вопросы с их эволюцией. В частности, разобраться с динамической эволюцией – ростом момента вращения галактического диска со временем, с химической эволюцией – постоянством металличности звездного населения диска на протяжении миллиардов лет, и с объяснением плавной истории звездообразования большинства дисковых галактик с коротким временем исчерпания газа. Осталось только увидеть в наблюдении эту аккрецию напрямую. Пока что

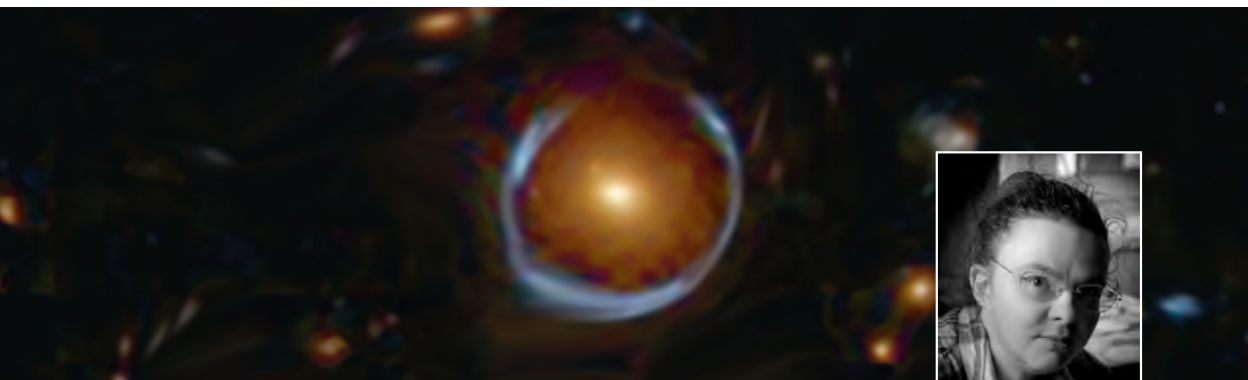


таких прямых наблюдательных свидетельств аккреции газа извне на галактики не так много; но то, что нам уже удалось увидеть, вроде бы намекает на то, что источников этой внешней аккреции – не один, и они могут быть разнообразны. Возможно, именно природой источников аккреции, геометрией и темпом притекания вещества определяется и конечный морфологический тип эволюционирующей галактики.

Литература

Сильченко О.К. Происхождение и эволюция галактик. Фрязино: Век–2, 2017.

СКЛАДКИ ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ: ИСТОРИЯ ПОИСКА КОСМИЧЕСКИХ СТРУН ВО ВСЕЛЕННОЙ



САЖИНА Ольга Сергеевна,

доктор физико-математических наук

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ

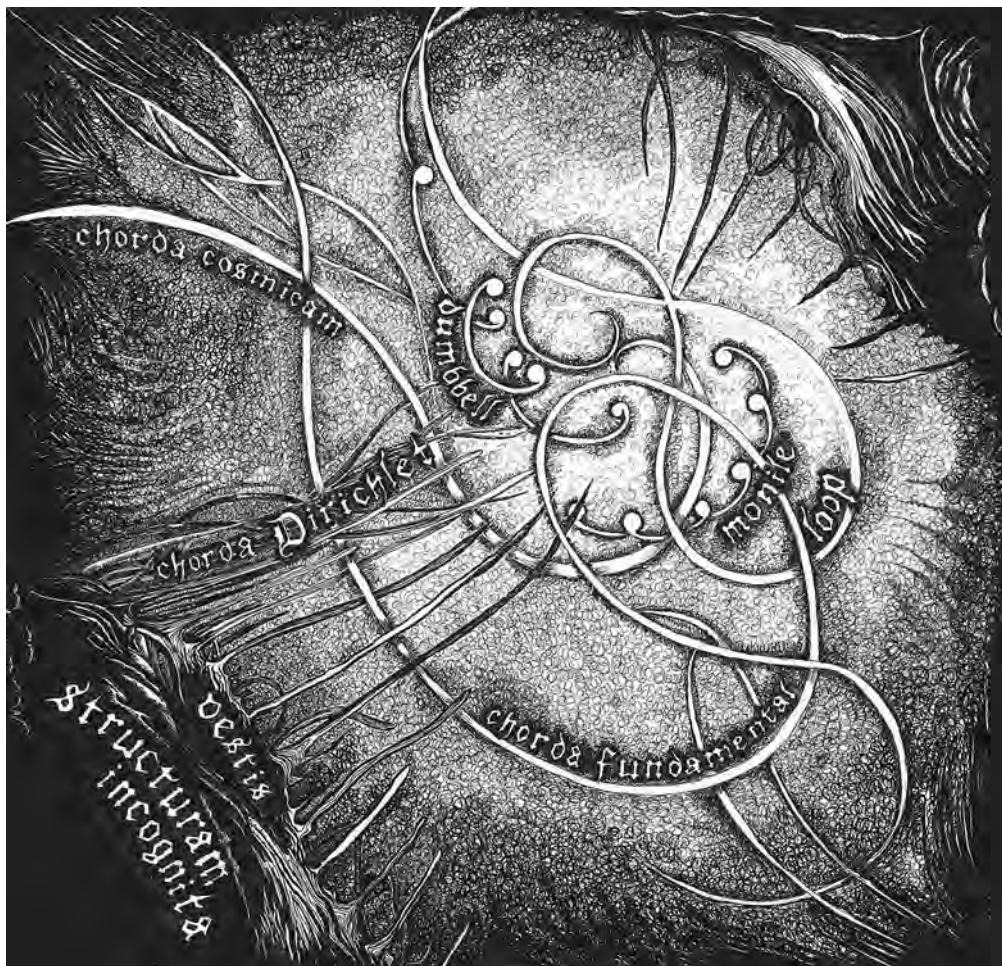
DOI: 10.7868/50044394824030022

ВВЕДЕНИЕ

Современные науки, изучающие космическое пространство – астрометрия, небесная механика, астрофизика, космология – смогли достичь глубокого понимания природы и эволюции космических объектов, точнейшего определения их динамики, а также понимания строения и эволюции Вселенной в целом, начиная с Большого взрыва и заканчивая не просто современным моментом времени, но экстраполируя наиболее вероятные сценарии в далекое будущее. Такие достижения стали возможными благодаря стремительному совершенствованию наземной и космической инструментальной базы, что позволяет вести наблюдения не только в широчайшем электромагнитном диапазоне длин волн, но и от-

крывает принципиально новый раздел наблюдательной астрономии – гравитационно-волновой. Растут вычислительные возможности для моделирования физических процессов, для обработки огромных объемов данных в том числе, даже в режиме реального времени.

Активно развиваются и теоретически модели. Астрофизика и космология давно берут на вооружение идеи и методы физики элементарных частиц, термодинамики, физики конденсированных сред, теоретической физики и многих других разделов естествознания. Однако только в очень недавнее, по меркам развития астрономии, время многие из абстрактных математических построений стали находить пути выхода на реальную проверку космическими наблюдениями. Так, ученые вплотную приблизились к наблюдательному поиску нетри-



«Зоопарк» космических струн: Вселенная с космическими струнами различных типов.
Рисунок автора

виальных структур во Вселенной, от различных топологических дефектов до проявлений скрытой многомерности нашего пространства-времени. Ранняя Вселенная – по меткому выражению советского физика и астронома Я.Б. Зельдовича, «ускоритель бедного человека», – предоставляет уникальные возможности проверки теорий, требующих для своей формулировки очень больших энергий, вплоть до энергии Планка (10^{19} ГэВ).

Экзотические структуры и объекты во Вселенной, которые, имея возможность

образоваться в очень ранней Вселенной, могли бы дожить со современного момента времени. Исследования по их поиску находят поддержку не только в современных математических моделях, но и в общепризнанных пробелах в Стандартной космологической модели, в современном понимании единой картины всех физических взаимодействий, а также в понимании структуры и происхождения скрытых секторов материи: темной материи и темной энергии.

В этой статье будут обсуждаться одни из наиболее значимых для кос-

мологии и наиболее хорошо теоретически обоснованных экзотических объектов во Вселенной – космические струны (КС). Пока существуют только косвенные наблюдательные признаки их существования во Вселенной, однако имеющейся статистической достоверности уже вполне хватает, чтобы поддерживать надежду и энтузиазм для дальнейших поисков.

Можно сказать без преувеличения, что реальное существование КС произвело бы настоящую революцию в современной Стандартной космологической модели, потому что открыло бы наблюдательную дорогу, в том числе к исследованию многомерности нашего пространства-времени, о котором ученые пока размышляют всего лишь с точки зрения теории.

КОСМИЧЕСКИЕ СТРУНЫ КАК ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

В космологию струны, названные космическими, изначально были введены как объекты, имеющие так называемое топологическое происхождение.

Если не говорить о строгом математическом определении топологических дефектов и рассматривать их как физические объекты, то можно сказать, что они образуются в различных средах под влиянием внешних полей или различных физических воздействий, а также в результате фазовых переходов и нарушая при этом определенные симметрии. Простейший пример – фазовый переход воды в лед при ее охлаждении. Жидкая фаза, очевидно, симметрична во всех направлениях, в то время как в твердой фазе появляются выделенные направления – кристаллики льда, – что уменьшает число симметрий всей системы. В целом, понятие топологического дефекта используется для описания физических локализованных структур в конденсированных средах (в различных кри-

сталлах, в том числе жидких, в сверхтекучих жидкостях и сверхпроводниках), а также в ранней Вселенной (монополи, КС, доменные стенки, текстуры), в физике элементарных частиц (в струнных моделях адронов в теории сильных взаимодействий). Топологические дефекты в лабораторной физике давно являются реальными физическими объектами. Так, советскому физiku А.А. Абрикосову была присуждена Нобелевская премия (2003) за теорию так называемой вихревой решетки Абрикосова. Топологические дефекты, предсказанные в физике твердого тела и обнаруженные экспериментально, имеют аналоги в теории элементарных частиц и теории поля. Следовательно, многие из этих структур должны существовать в природе.

Что касается КС, то такие топологические дефекты могли образоваться в ранней Вселенной в результате нарушения симметрии во время фазовых переходов вакуума. Основная идея заключается в том, что, как и в системах с конденсированным веществом, фазовый порядок увеличивается с повышением температуры, что приводит к восстановлению симметрии. Например, спонтанно нарушенная симметрия теории, которая описывает электромагнитное и слабое взаимодействия как одно целое (электрослабая теория) могла быть восстановлена при высоких температурах ранней Вселенной. При понижении температуры соответствующие симметрии могут нарушаться, однако, согласно математическому описанию симметрий с помощью теории групп, ни при всех таких нарушениях могут образовываться КС. Раз образовавшись, КС представляют собой очень тонкие, но очень длинные макроскопические структуры и, соответственно, должны обладать макроскопическими свойствами – это и является предметом поисков астрономов. Пространственные масштабы влияния КС могут быть сопоставимы

с размером современной видимой Вселенной. КС характеризуется энергией на единицу длины (линейной плотностью), которая зависит от того, при каких энергиях родилась струна. Все теоретически описываемые струны являются настолько «тяжелыми», другими словами, обладают настолько большими энергиями, что могут, например, пройти сквозь Землю как сквозь пустое пространство, даже не почувствовав ее. Для средней струны ее участок в одну астрономическую единицу может весить как вся наша Солнечная система, но допустимы струны и гораздо тяжелее. Единственным астрофизическим объектом, который способен «вступить в контакт» с КС является черная дыра.

Из какого же «вещества» сделаны КС, что именно в ранней Вселенной претерпевает фазовые переходы? Ученые говорят о вакууме, которое может быть определено как некоторое поле. Если считать, что такой феномен, как темная энергия, ассоциирован с вакуумом, то можно сказать, что КС состоят из реликтовой темной энергии, которая оказывается «пойманной» в окружении новой темной энергии.

В ранней горячей Вселенной вакуумное состояние могло обладать большим количеством симметрий. По мере того как Вселенная расширялась и охлаждалась от своей начальной высокосимметричной фазы, она проходила через серию фазовых переходов, каждый из которых частично утрачивал первоначальную симметрию. Во Вселенной этот процесс продолжался до тех пор, пока при низких температурах сначала не стало преобладать излучение, а затем вещество. Каждая из стадий имела соответствующую симметрию, определяемую фундаментальными взаимодействиями. Таким образом, экспериментально подтвержденная физика элементарных частиц низкой энергии описывает два из четырех фундаментальных взаимо-

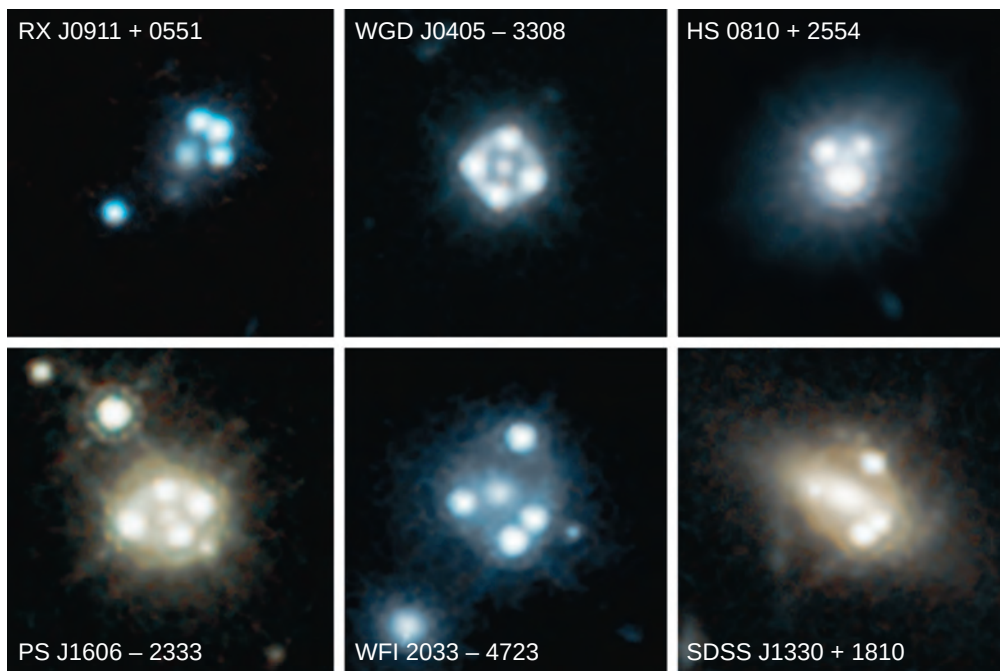
действий: электромагнитное и слабое ядерное (модель Вайнберга-Салама), каждое из которых математически описывается своими симметриями. Сильные ядерные взаимодействия, которые приводят к удержанию кварков, также связаны с определенной симметрией. Теории объединения четырех фундаментальных взаимодействий, включая гравитационное, предсказывают многочисленные фазовые переходы, связанные с нарушением различных групп симметрий в разные моменты времени и при разных энергиях, вплоть до планковской. Пока такая теория Великого объединения не имеет ни экспериментальных, ни наблюдательных подтверждений, хотя существует множество указаний на существование новой физики за пределами известной Стандартной модели.

КС теоретически могли бы образовываться при очень многих из описанных фазовых переходов, т. е. ассоциироваться, например, либо с нарушением электрослабого взаимодействия, либо с нарушением какой-то их объединенных высокосимметричных теорий. Чем из более высокосимметричной и пока еще гипотетической теории рождается КС, тем она «тяжелее».

КС как возможные космологические объекты были впервые предсказаны Т. Кибблом (1976) и активно изучались в последующие годы Я.Б. Зельдовичем, А. Виленкиным, П. Шеллардом, М. Хиндмаршом, М. Сажиным и многими другими исследователями, как астрономами, так и физиками-теоретиками.

ПОИСК КОСМИЧЕСКИХ СТРУН ПО ЭФФЕКТУ ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ

Существование струн в космосе широко поддерживается в теории и, что немаловажно, наличием большого количества реальных лабораторных примеров



Изображения шести гравитационных линз. Фото: космический телескоп «Хаббл»

в различных областях физики. Кроме того, эти объекты не вносят противоречий в имеющиеся на данный момент данные космологических наблюдений.

Однако, что касается непосредственных наблюдений КС, то вопрос оказывается гораздо более сложным. Такой объект, будучи очень тонким и очень длинным, масштабов галактик или даже всей видимой Вселенной, сам по себе невидим, но теоретически может и должен ярко проявлять себя косвенно в некоторых астрономических наблюдениях.

Одним из направлений таких наблюдений является гравитационное линзирование. Астрономам хорошо известен эффект гравитационного линзирования. Его механизм связан с тем очевидным фактом, что лучи света какого-нибудь далекого источника света, например галактики, двигаясь в искривленном массивными телами пространстве, будут двигаться уже не по прямым тра-

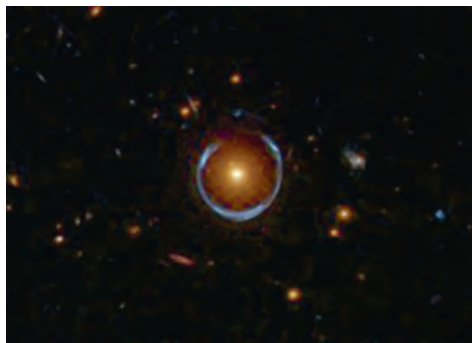
екториям, в результате чего мы, наблюдатели, увидим не сам этот далекий источник, а несколько его фантомных изображений.

Если на пути лучей попадет маломассивный объект, то нескольких разрешенных изображений не получится, однако сам источник будет или искажен (слабое линзирование), или будет наблюдаться изменение его блеска (микролинзирование). Гравитационное линзирование является, в том числе, мощным инструментом для поиска темной материи астрономическими методами, поскольку эта составляющая нашей Вселенной никак не проявляется себя в электромагнитном диапазоне, но проявляет себя гравитационно. Так, по искажениям далеких источников излучения можно строить точные «гравитационные карты» распределения темной материи.

КС тоже порождают вполне наблюдаемый эффект гравитационного лин-

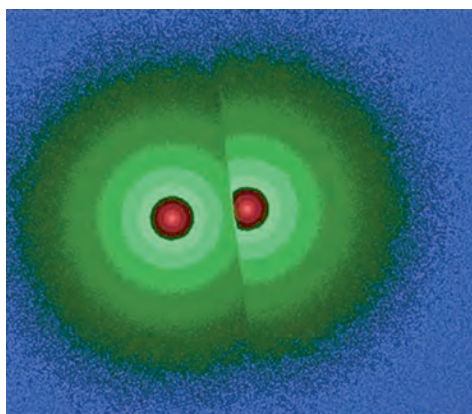
зирования, однако очень особенный. Особенность связана тем, что КС меняет глобальную геометрию нашего пространства. Согласно современным наблюдательным данным, астрономы и космологи могут с уверенностью утверждать, что наша Вселенная трехмерно плоская, другими словами, ее пространственная геометрия глобально евклидова (если говорить не только о пространстве, но и о времени, то соответствующее пространство-время называется в честь Г. Минковского). Если же во Вселенной присутствует КС, то Вселенная приобретает иную пространственную геометрию, а именно геометрию конуса. Это связано с тем, что математически Вселенная с такой струной описывается уже не просто метрикой Минковского, а метрикой Минковского с так называемым дефицитом угла. Другими словами, если мы хотим обогнуть струну по окружности, то длина этой окружности уже не будет равна 2π , она будет меньше. Если говорить с точки зрения наблюдений, то, окажись между далеким источником и нами, наблюдателями, такая струна, то лучи света на пути к нам будут огибать этот конус по обе стороны от вершины и, таким образом, образуется два изображения этого источника.

Очень важно отметить отличия от обыкновенного гравитационного линзирования. В случае КС лучи будут двигаться в плоском пространстве, и полученные два изображения будут лишены каких бы то ни было искажений. Очевидно, что случае обыкновенного гравитационного линзирования лучи света движутся в искривленном пространстве, и поэтому получаемые изображения будут, как правило, обладать значимыми искажениями. Более того, если массивное тело и далекий источник находятся на одном луче зрения, то мы увидим максимально искривленное изображение – кольцо (так называемое кольцо Эйнштейна).

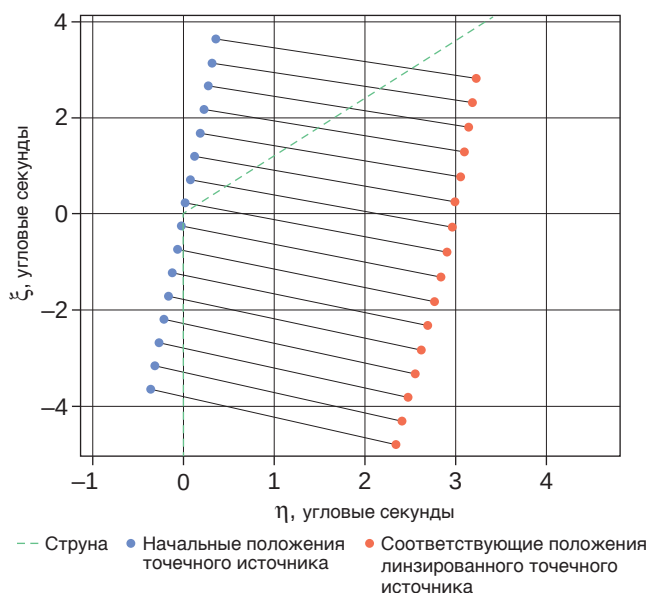


Изображение гравитационно-линзовой системы LRG 3-757 («Подкова»).
Фото: космический телескоп «Хаббл»

Отсутствие искажений на изображениях фонового источника – не единственная отличительная черта гравитационного линзирования на КС. В силу того, что струна очень тонка, при проекционном расположении струны не точно посередине линзируемого источника одно из изображений будет обладать резкими характерными срезами внешних изофот яркости. Такие срезы возможно различить на космическом



Моделирование гравитационного линзирования галактики на КС. Отчетливо видно отсутствие искажений изофот яркости, а также характерные срезы, обусловленные существенной одномерностью КС. Рисунок автора



Моделирование, показывающее отсутствие гравитационно-линзовых изображений на КС с изгибом (для простоты представлен изломом). Синие точки: истинное положение источника. Красные точки: положение изображения, которое единственно и представляет собой просто смещение реального источника.
Рис. И.И. Булыгина

телескопе «Хаббл», а также на недавнем вступившем в строй новом телескопе Euclid.

Кроме того, как догадается внимательный читатель, поскольку струна предполагается очень длинной, то она будет порождать множество гравитационно-линзовых пар фоновых источников, другими словами, формировать характерный только для струны так называемый «новый Млечный путь» таких пар.

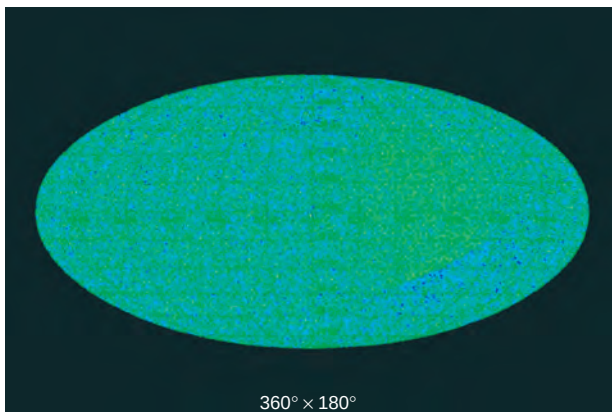
Совсем недавно при математическом моделировании гравитационного линзирования на КС обнаружился очень интересный эффект (И.И. Булыгин и др., 2023). Дело в том, что до сих пор, говоря о двойных изображениях, всегда подразумевалась простая модель, когда КС прямая и перпендикулярна лучу, соединяющему наблюдателя и далекий излучающий объект. Однако в реальности, очевидно, струна может быть и наклонена к наблюдателю, и изогнута. Если же учесть эти эффекты, то оказывается, что при определенном изгибе струны двойные изображения вообще не образуются! Другими словами, эффект гравитаци-

онного линзирования может быть вообще не наблюдаем для реалистичных КС. Это, конечно, не очень хорошие новости, однако с успехом объясняют тот факт, что, несмотря на убедительные теоретические предсказания струн во Вселенной, так и не наблюдаются соответствующие гравитационно-линзовые события в массовом количестве – самое общее и естественное проявление наличия струн во Вселенной.

ПОИСК КОСМИЧЕСКИХ СТРУН ПО АНИЗОТРОПИИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В космологии общепринятой является Стандартная космологическая модель, согласно которой наша Вселенная родилась примерно 14 млрд лет назад в результате Большого взрыва и сейчас находится в состоянии расширения, даже более того, в состоянии ускоренного расширения. Как известно из школьной физики, все тела с расширением охлаждаются. Это означает, что в далеком прошлом Вселенная была очень горячей – горячей настолько, что

Моделирование «отпечатка» КС
на фоне тестового шума.
Данные традиционно
отображены в проекции
Мольвейде (экватор – плоскость
Галактики). Рисунок автора



находилась в состоянии плазмы, когда фотоны постоянно сталкивались с частицами вещества и не могли «вырваться на свободу». Однако Вселенная расширялась и охлаждалась, и примерно через 380 тыс. лет после Большого взрыва Вселенная остыла настолько, что частицы объединились в нейтральные атомы, а излучение получило возможность распространяться свободно. Тогда его температура составляла примерно 3 тыс. К, а к современному моменту времени, когда Вселенная расширилась примерно в тысячу раз, это излучение приобрело температуру всего в 2.71 К. Оно носит название реликтового излучения, самого первого, родившегося во Вселенной. Соответствующая сферическая поверхность называется поверхностью последнего рассеяния.

Очевидно, что все без исключения космические объекты, в том числе и КС, находятся между нами и этим реликтовым излучением, а потому на его карте (полученной, в том числе, космическими обсерваториями WMAP и Planck), с неизбежностью должны быть «отпечатки» КС. Поскольку, как мы уже обсуждали, струны являются существенно одномерными объектами, то на карте неоднородностей реликтового излучения должны быть пятна с резкими перепадами температуры, и именно их следует искать в астрономических данных.

Конечно, эти перепады будут очень незначительны на фоне основной анизотропии, вызванной и движением нас, наблюдателей, относительно реликтового излучения, и колебаниями поверхности последнего рассеяния, связанного с различным распределением на ней вещества, и с другими эффектами. Тем не менее эти перепады можно и нужно искать с помощью соответствующей статистической обработки данных.

РЕДКИЕ СОБЫТИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СТРУН

Мы оказались бы счастливыми в поиске КС, если бы нам довелось стать свидетелями такого редчайшего события, как взаимодействие вращающейся черной дыры и КС. Будучи топологической и поэтому не имея концов в силу сохранения так называемого топологического заряда, космическая струна принялась бы бесконечно наматываться на черную дыру, порождая излучение на больших промежутках времени и, скорее всего, в довольно широком диапазоне электромагнитных волн. Поскольку КС обладает энергией, то, скорее всего, такое наматывание привело бы к росту массы черной дыры, и пределы этого роста неизвестны.

Если дополнительно задаться теоретическими условиями, что струна может обладать каким-либо зарядом, то возможен поиск какого-либо излучения от этого и без того экзотического объекта.

Наконец, наверное было бы очень интересно наблюдение за процессом взаимодействия двух или даже более КС.

Очевидно, что все указанные процессы гораздо более редки, чем возможные наблюдения эффекта гравитационного линзирования или поиска «отпечатков» струны на карте анизотропии реликтового излучения. И все указанные методы нужно отложить до тех счастливых времен, когда КС действительно будет убедительно найдена.

КОСМИЧЕСКИЕ СТРУНЫ КАК УКАЗАНИЕ НА РЕАЛЬНОСТЬ МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВ

Уделив большое внимание описанию топологических дефектов, теперь очень важно отметить, что КС могли бы иметь и нетопологическую природу, связанную со скрытой многомерностью пространства-времени. Такие модели возникают в попытке построения единой теории всех физических взаимодействий и в попытке решить важнейшую проблему объединения теории гравитации и квантовой теории.

Обнаружилось (пока, конечно, только теоретически), что объекты, аналогичные КС, могут возникать и совсем другим способом, а именно в многомерных теориях, как результат взаимодействия многомерных пространств.

Так, космологические суперструны могут возникать в модели мира на бране, согласно которой наш мир погружен в пространство большего числа измерений. Дефекты этого типа представляют собой макроскопические состояния фундаментальных струн (F-струны), а также браны Дирихле (Dp-браны или ассоциированные с ними D-струны),

растянутые в одном из макроскопических измерений. Кроме того, существуют M-браны и так называемые браны Навье-Шварца, поведение которых также аналогично поведению КС; их единственное пространственное измерение намотано на дополнительные измерения пространства-времени.

Говоря о космических суперструнах, следует отличать их от собственно суперструн, элементарных «кирпичиков» материи в соответствующей теории. Важно отметить, что в нашем четырехмерном пространстве-времени фундаментальные микроскопические суперструны не могут растягиваться и достигать космологических масштабов. Будь так, они бы «разрывались», превращаясь в систему микроскопических струн. К существованию суперструн в космологических масштабах приводит свертывание (компактификация) дополнительных измерений в многомерной модели мира на бране либо взаимодействие бран в объемлющем пространстве. В этом случае фундаментальные суперструны есть результат такого взаимодействия.

Что касается бран Дирихле и соответствующих им D-струн, то в многомерном пространстве, помимо фундаментальных струн, допустимы и струны, присоединенные к D-бранам. Основное свойство модели мира на бране применительно к струнам заключается в том, что обычная материя сосредоточена на гиперповерхности, встроенной в многомерное объемлющее пространство (так называемый балк), и все взаимодействия, за исключением гравитационного, распространяются только на бране, в то время как гравитация может распространяться в балке. Так, энергия такой суперструны (которая в балке равна планковской энергии) может оказаться значительно меньше в четырех пространственных измерениях нашего мира.

Фундаментальные струны и D-струны могут объединяться друг с другом,

образуя одномерные объекты, называемые FD-струнами. Визуально представить полученную струну можно, например, в виде двух линий, которые приближаются друг к другу под некоторым углом и переплетаются в «косичку».

Основное различие между топологическими КС и КС, которые являются продуктами многомерных теорий, заключается в особенностях их взаимодействия друг с другом. Поскольку вероятность обнаружения двух или более взаимодействующих струн гораздо ниже, чем вероятность обнаружения одной струны, то с точки зрения наблюдения такая разница пока не существенная. На данный момент не разработано четких критериев, позволяющих различать эти струны, поскольку они ведут себя сходным образом с точки зрения эффектов гравитационной линзы или влияния на анизотропию реликтового излучения.

В ПОИСКАХ КОСМИЧЕСКИХ СТРУН

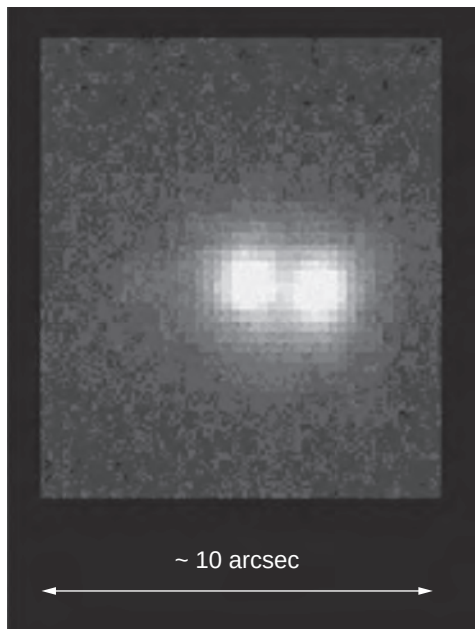
Поиск КС с помощью эффекта гравитационного линзирования начался в 1980-х гг. с изучения нескольких пар квазаров (G. Hazard и др.). Было сообщено о «концентрации» квазаров в поле с координатами $\alpha = 11^{\text{h}}46^{\text{m}}14^{\text{s}}$ и $\delta = 11^{\circ}11'42''$ (координаты указаны на эпоху B1950). У двух квазаров из этой группы обнаружили одинаковые красные смещения, что является необходимым условием для гравитационно-линзовых изображений, поскольку они, очевидно, находятся на одном и том же расстоянии от наблюдателя. Однако угловое расстояние между этими квазарами оказалось слишком большим, больше $1'$. С точки зрения традиционной теории, рассматривающей сети (т. е. априорно большое количество) КС, считалось невозможным подобрать параметры струны для соответствия таким наблюдательным данным, однако недавние исследования нашей группы

показывают, что эти расстояния все же могут быть допустимы для одиночных КС. Поиски пар квазаров продолжались (например, QSO1146+111B, C), но расстояние между компонентами пар снова оказалось слишком большим.

Статья о возможном обнаружении КС была опубликована в 1987 г. (L.L. Cowie1, E.M. Hu), когда в поле $45'' \times 45''$ с центральными координатами $\alpha = 2^{\text{h}}49^{\text{m}}23^{\text{s}}.00$; $\delta = -18^{\circ}25'32''$ (B1950) была обнаружена группа из четырех двойных галактик, которые демонстрировали характеристики гравитационного линзирования на КС. Так, каждая пара состояла из двух почти идентичных объектов с почти одинаковым угловым расстоянием между компонентами. У трех пар было одинаковые красные смещения, что указывало на их пространственную близость, а компоненты четвертой пары обладали одинаковыми спектрами. Исследователи отмечали, что необходимы дополнительные исследования, которые и были вскоре осуществлены, в результате чего спектры четвертой пары все-таки оказались немного различными. Наблюдения в радиодиапазоне (J.N. Hewitt, 1990) также не подтвердили гипотезу КС для этих объектов.

Поиски продолжались, но, к сожалению, очень часто естественным альтернативным объяснением для гипотезы КС при обнаружении нескольких близко расположенных и схожих объектов (галактик) оказывалась просто принадлежность их к физически связанному единому скоплению галактик или эффект проекции, когда физически далекие галактики расположены на малом угловом расстоянии друг от друга.

Одно из наиболее резонансных исследований последних 20-ти лет – это обнаружение российско-итальянской группой (Сажин и др., 2002) двойного объекта CSL-1 (Capodimonte-Sternberg-Lens-1, $\alpha = 12^{\text{h}}23^{\text{m}}30^{\text{s}}.5$; $\delta = -12^{\circ}38'57.0''$ (J2000)), состоящего из двух эллиптических галактик, иден-



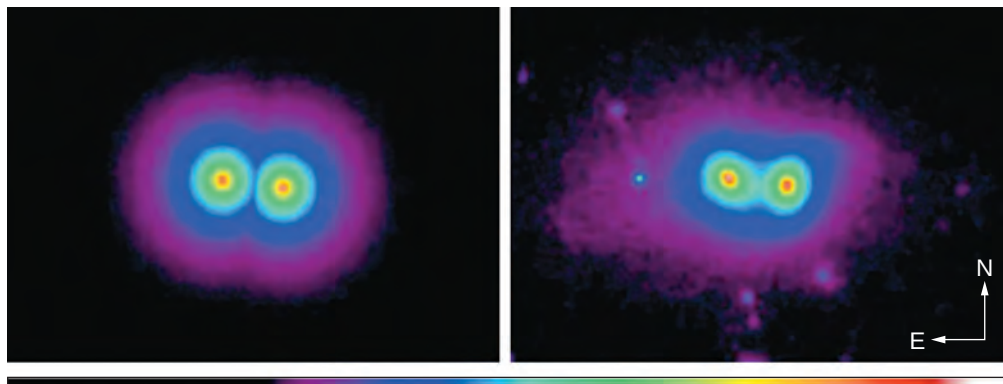
Объект CSL-1 (снимок глубокого обзора астрономической обсерватории Каподимонте, 2002 г.)

тичных по морфологии, красному смещению и спектрам, разделенных угловым расстоянием около 2". Объект был обнаружен в глубоком обзоре

астрономической обсерватории Каподимонте в г. Неаполе (Италия). Никакие модели и наземные наблюдения не смогли опровергнуть гипотезу КС, пока в 2004 г. этой научной группой не было получено время для наблюдений на телескопе «Хаббл», в результате которых, к огромному сожалению не только самих исследователей, но и всей мировой научной общественности, было показано, что этот двойной объект представляет собой все-таки пару различных галактик, очень близких пространственно, но расположенных так, что приливные гравитационные искажения заметны только на космическом телескопе высокой разрешающей способности. Такой объект сам по себе очень большая редкость, но интерес к нему был мгновенно потерян, настолько сильны были ожидания подтверждения гипотезы именно космической струны.

Поиски продолжались. Помимо поиска характерных гравитационно-линзовых изображений и их цепочек, один из способов – это наблюдение аномальных колебаний яркости источников, которые могут быть вызва-

Объект CSL-1. Моделирование в случае гравитационного линзирования на космической струне, которое было бы наблюдаемо на телескопе «Хаббла» (слева). Реальный снимок объекта на телескопе «Хаббл» (справа). В реальных наблюдениях присутствуют указания на наличие приливных сил между компонентами пары. По материалам работ российско-итальянской группы (М.В. Сажин и др., 2004)



ны эффектом микролинзирования на колеблющихся петлях КС. Подобные квазипериодические всплески яркости у двух гравитационно-линзовых изображений квазара Q0957+561A, В наблюдались в 2004 г. Однако ученым не хватило статистических данных для каких-либо уверенных выводов.

Наличие осциллирующих и схлопывающихся петель петель у КС дало бы дополнительные наблюдательные «окна» для их поиска: например, множество таких петель могли бы стать источниками низкочастотных гравитационных волн.

Другой способ поиска КС, какого бы происхождения они ни были, заключается в анализе анизотропии реликтового излучения. Как уже было сказано, КС должна оставлять на карте реликтового излучения очень характерный отпечаток – к сожалению, довольно сильно «замытый» неоднородностями другой природы, в том числе очень большими шумами нашей собственной Галактики (синхротронное излучение, излучение пыли и др.), и требующий поиска с помощью методов математической статистики и использованием подходящих фильтров.

Одним из таких простейших, но эффективных фильтров является ступенчатая функция Хаара, которая позволяет искать скачкообразные перепады температуры на картах анизотропии реликтового излучения, полученные космическими обсерваториями WMAP и Planck. Так, в 2014 г. с помощью такого фильтра было найдено несколько кандидатов в КС, в том числе кандидат CSc-1, который интересен тем, что на протяжении 2019–2024 гг. в области его предполагаемого нахождения искались и гравитационно линзовые пары (Сажина и др.).

Поговорим о результатах этих исследований. Очевидно, что гравитационно-линзовые пары должны присутствовать во Вселенной и не будучи никак

связанными с КС, это могут быть обыкновенные гравитационные линзы, образовавшиеся путем линзирования далеких галактик на таких же галактиках. Искажения изофот при большом удалении не будут заметны, и неразрешенные объекты морфологически будут очень напоминать ситуацию линзирования на КС. Однако, если струна действительно находится в исследуемом поле, то таких событий должно быть, очевидно, больше, и они должны формировать своего рода цепочки гравитационно-линзовых пар на все прохождение КС. Вот такой избыток и был обнаружен исследователями, что, конечно, является весомым, хотя пока что только статистически, доказательством наличия струны. Ученые пошли и дальше – взяли одну такую пару и проверили ее на соответствие модели наклонной КС. Совпадение наблюдений и моделирования оказалось почти идеальным! Только вот КС получалась слишком уж «тяжелой», по энергии сравнимой с облучаемой выше фундаментальной нетопологической струной, и поэтому нужны дополнительные исследования и моделирование. Как бы ни хотелось впервые обнаружить указания на многомерность нашего пространства, все-таки топологические струны представляются более реалистичными, поскольку их существование подтверждено лабораторно.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В качестве итогов – одни вопросы вместо ответов. Так, хотелось бы обратить внимание читателя на некоторые проблемы в довольно распространенном подходе по поиску КС. Дело в том, что ряд исследований по наблюдательному поиску КС по анизотропии реликтового излучения до сих пор основываются на априорном предположении о наличии сетей таких объектов, сформированных

в результате фазовых переходов. Можно ограничить вклад сети таких топологических струн в общую энергию Вселенной (по данным космических обсерваторий WMAP и Planck), однако при таком подходе нельзя определить, сколько именно струн может оказаться во Вселенной. Другими словами, современные наблюдательные данные не противоречат такой ситуации, когда имеется не множество «легких» струн, но только одна «тяжелая». Легкие струны обладают меньшими энергиями и могли бы сформироваться позже, например, при электрослабых фазовых переходах в ранней Вселенной. Тяжелые струны могут обладать энергиями вплоть до планковской и быть сформированными в эпохи, близкие к эпохе инфляции или даже раньше, если предположить их нетопологическое происхождение и связь с многомерными пространствами.

Другими словами, при текущем состоянии исследований в области поиска КС, при отсутствии массового гравитационного линзирования на предполагаемых сетях, представляется разумным задавать параметры струн в возможно широком диапазоне, и не ограничиваться только множеством легких топологических струн. И только уже найдя хотя бы один такой объект, следует попытаться понять его происхождение и детальные свойства.

Очень большим подспорьем в поиске в будущем окажет гравитационно-волновая астрономия. Уже сейчас открытый в 2023 г. гравитационно-волновой фон может быть хотя бы частично ассоциирован с гравитационным излучением колеблющихся КС, прежде всего петель. Конечно, при попытках учесть нетопологическое происхождение струн или рассматривать их в становящихся все более популярными модифицированных теориях гравитации, будут возникать серьезные математические трудности в попытках

сопоставить расчетный и наблюдаемый сигналы. Фактически, придется пересчитывать заново все возможные эффекты, давно вычисленные в теории относительности, в том числе связанные и с возможным излучением струн.

При рассмотрении эффекта гравитационного линзирования до недавнего времени рассматривались простые модели, в которых струна считалась или прямой и перпендикулярной лучу зрения, или подчиняющейся модели броуновского движения. В первом случае все эффекты вычисляли в коническом пространстве в пределах геометрической оптики, а во втором случае проводились численные моделирования. В общем случае искривленной и наклонной струны требуется решать уравнения общей теории относительности или еще более сложные уравнения модифицированных теорий гравитации (например, теории Бранса-Дикке или теории Хорндекси).

Поиск КС во Вселенной – задача трудная и многоплановая. Однако велик и приз. Обнаружение КС космических масштабов позволило бы не только раскрыть природу и закономерности эволюции темной энергии в ранней Вселенной, но и изучить масштаб энергий, недостижимых на современных земных ускорителях, а также выявить нетривиальную глобальную структуру нашей Вселенной.

Литература

1. Sazhin M.V., Sazhina O.S. Space fabric wrinkles: history of observational searches for exotic structures in the Universe. Riv. Nuovo Cim. 44, 397–451 (2021).
2. Сажина О.С. Топологический дефект // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. (Дата публикации: 26.07.2022. Дата обновления: 01.11.2022.)
3. Сажин М.В., Сажина О.С. Теория Большого взрыва // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. (Дата публикации: 09.06.2022. Дата обновления: 20.09.2023.)

ОТ ЗЕМЛИ ДО ВСЕЛЕННОЙ: ИСТОРИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ



ЦВЕТКОВ Александр Станиславович,

Санкт-Петербургский государственный университет

DOI: 10.7868/50044394824030034

Измерение расстояний в астрометрии, астрофизике и космологии – это одна из ключевых задач для понимания устройства и динамики нашей Вселенной и объектов в ней. Этим вопросом задавались мыслители еще с античных времен, и до сих пор он окончательно не решен. В статье пойдет речь о том, как измеряли космические расстояния в прошлом и какие существуют современные методы определения расстояний до звезд и галактик, а также какие трудности при этом возникают.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения небесных светил велись с глубокой древности. В античные времена эти наблюдения систематизировались и приводили к созданию довольно обширных и точных (по меркам того времени) звездных каталогов. Первый

звездный каталог, который упоминается в исторических документах – это каталог Гиппарха. Составлен, вероятно, около 129–127 до н.э. Каталог долгое время считался утерянным в раннехристианский период – вероятно, во время пожара Александрийской библиотеки. Однако в 2022 г. было сообщено о находке его части, которая уцелела под текстами *Codex Climaci Rescriptu* («First known map of night sky found hidden in Medieval parchment». Nature, 2022). Судя по всему, этот каталог являлся далеко не первым, так как Гиппарху удалось обнаружить такое явление, как прецессия земной оси, что возможно лишь при сравнении координат звезд с данными предыдущих каталогов (III в. до н.э.). Любопытно, что координаты звезд в античных каталогах приводились, по-видимому, в эклиптической системе координат, поскольку прецессия равномерно изменяет эклипти-

ческие долготы звезд, но не меняет их широты, что сильно упрощает перевод координат звезд на ту или иную эпоху. Несмотря на такие достижения, точности определения координат, составлявшие минуты, даже десятки минут дуги, не позволяли определить не только годовые параллаксы звезд, но даже собственные движения, т. е. изменения координат звезд, вызванные их движением в пространстве. Задача определения собственных движений является более простой, так как эффект накапливается с увеличением временного промежутка между наблюдениями.



Вычисление размеров Земли
Эратосфеном Киренским

Отсутствие годичной картины периодического изменения расположения «неподвижных звезд» было одним из доводов в пользу геоцентрической системы мира. Понадобилось почти два тысячелетия для того, чтобы «лот, закинутый в глубины мироздания, достал дно» (Зигель Ф.Ю. Сокровища звездного неба. Путеводитель по созвездиям и Луне. 1980).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗЕМЛИ

Для определения расстояний в Солнечной системе методом горизонтального параллакса как сейчас, так и в древние времена, требовалось знать размер Земли. Считается, что первым ученым, который рассчитал размеры нашей планеты, был Эратосфен Киренский (276–194 до н.э.). Его метод хорошо известен читателю еще со школьной скамьи. Ученый обратил внимание, что в день летнего солнцестояния Солнце в Сиене находится ровно в зените (так как этот город находился точно на тропике Рака), в то время как в Александрии Солнце в этот момент находилось на расстоянии около 7 градусов от зенита. Зная линейное расстояние дуги, оцененное ученым как 5 тыс. греческих стадий (852 км), он рассчитал, что радиус земного шара составляет 6287 км, что оказалось поразительно близко к современной оценке в 6371 км.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ЛУНЫ И СОЛНЦА

К античному времени относятся и первые попытки определить «космические» масштабы. Здесь следует обратить внимание на сочинение Аристарха Самосского «О величинах и расстояниях Солнца и Луны». До появления этой работы высказывания древнегреческих философов носили умозрительный характер. Аристарх впервые использовал научный метод, основанный на наблю-

дении лунных затмений и лунных фаз. В 270 г. до н.э. Аристарх Самосский вычислил расстояние до Луны по продолжительности лунного затмения. Он предположил, что Солнце – далекий точечный источник, и тень Земли имеет цилиндрическую форму диаметром $2r_{\oplus}$ (на самом деле из-за конической формы тени диаметр ее на орбите Луны на 25% меньше). Максимальная длительность лунного затмения составляет $t = 3.5$ ч. Луна делает оборот вокруг Земли за $T = 27.3$ сут., проходя расстояние $2\pi R$, где R и есть искомый радиус лунной орбиты, если считать ее круговой. Предполагая, что Луна движется по своей орбите равномерно, можно составить простую пропорцию:

$$\frac{2r_{\oplus}}{t} = \frac{2\pi R}{T}.$$

Подставив в это уравнение вышеприведенные значения t и T , получим $R \approx 60r_{\oplus}$, что очень близко к истинному значению, составляющему 385 тыс. км.

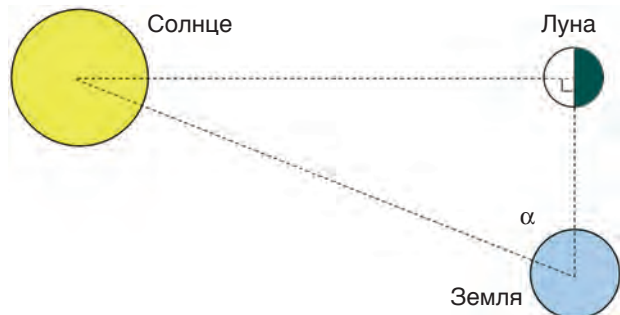
Значительно сложнее оказалось определение расстояния до Солнца. Для него Аристарх предложил весьма остроумный метод.

Для определения расстояния до Солнца Аристарх сделал верное предположение, что фазы Луны соответствуют шару, освещаемому с разных сторон Солнцем. Следовательно, если Луна находится в первой или последней четверти (в так называемой квадратуре),

то угол «Солнце–Луна–Земля» – прямой. Если измерить угол α между Луной и Солнцем (это теоретически можно сделать, т.к. Луна легко наблюдается днем), то можно, решив прямоугольный треугольник, определить расстояние до Солнца. Однако тут возникают серьезные трудности. Во-первых, очень сложно «на глаз» определить точно момент первой или последней четверти, во-вторых, при наблюдении днем сложно без специальных фильтров точно определить направление на центр Солнца. Если наблюдать Солнце ближе к горизонту, когда его свет не столь ярк, то необходимо учитывать довольно сильную (до половины градуса) атмосферную рефракцию, т.е. искажение направления на объект, вызванное преломлением света в атмосфере, о чем в античные времена не имели понятия. По оценкам Аристарха, угол $\alpha = 87$, что дает расстояние до Солнца в 19 раз больше расстояния от Земли до Луны, и само Солнце также в 19 раз больше Луны и примерно в 5 раз больше Земли. На самом деле отличие угла α от прямого составляет всего 9 угловых минут, и расстояние до Солнца почти в 400 раз больше расстояния до Луны.

Тем не менее Аристарху Самосскому удалось показать, что масштабы даже известной в то время Вселенной значительно превосходят размер земного шара, Солнце находится дальше, чем

*Метод Аристарха Самосского для определения расстояния от Земли до Солнца.
Схема взаимного расположения Солнца, Луны и Земли во время квадратуры*



Луна, и его радиус в несколько раз превосходит земной, что впервые подтолкнуло к созданию гелиоцентрической системы мира.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

В эпоху классической астрономии использование суточного параллакса (иногда называемого горизонтальным, хотя есть некоторые терминологические тонкости) было единственным способом установления масштабов в Солнечной системе. При одновременном наблюдении (в разных обсерваториях) положений объектов Солнечной системы они проецируются на разные участки небесной сферы, что позволяет определить параллактический угол α .

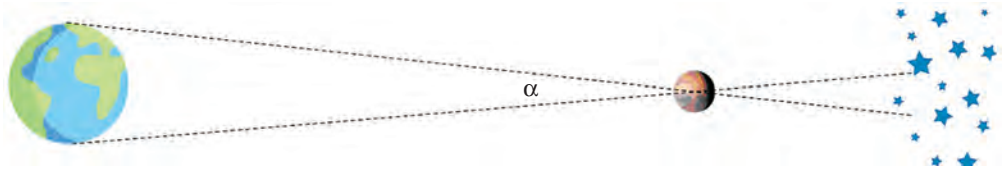


Схема определения горизонтального параллакса

Возможно даже определение этого угла в одном пункте с помощью суточного вращения Земли (отсюда и название этого параллакса), однако в этом случае необходима коррекция за собственное перемещение планеты (или астероида) в течение нескольких часов.

К сожалению, наблюдение суточного параллакса Солнца крайне затруднено его яркостью и протяженными размерами, а суточный параллакс больших планет мал, как это указано в таблице, и даже для Венеры меньше 1 минуты дуги, что находится за пределами точности наблюдений невооруженным глазом. Таким образом, суточный параллакс Солнца не мог быть обнаружен в дотелескопическую эру.

Максимальный суточный параллакс больших планет (при их минимальном сближении с Землей)

Планета	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер	Сатурн
α''	27	53	32	3.8	1.9

В 1672 г., одновременно с французским астрономом, инженером и картографом Жаном Рише во Французской Гвиане итало-французский астроном и инженер Джованни Д. Кассини в Париже проводил наблюдения Марса.

Был довольно точно измерен параллакс этой планеты с базой около 12 тыс. км и впервые расстояние до Марса было вычислено с хорошей точностью. Исходя из этих измерений, Кассини смог довольно надежно определить расстояние от Земли до Солнца: 146 млн км (по современным данным это 149.6 млн км).

Кассини заметил, что предсказанные им моменты затмений спутника Юпитера Ио постоянно отклонялись от наблюдаемых в пределах 22 мин. Причину этого открыл коллега Кассини по Парижской обсерватории Олаф Рёмер: наибольшие отклонения происходили тогда, когда Земля и Юпитер находились по разные стороны Солнца,

поэтому Рёмер предположил, что скорость света конечна, и диаметр земной орбиты свет проходит за 22 мин., откуда он получил первую оценку скорости света: около 220 тыс. км/с (по современным данным величина скорости света в вакууме составляет около 299 792 км/с).

Для уточнения масштабов Солнечной системы использовались такие явления, как покрытия планетами звезд, которые позволяют точно засечь момент времени покрытия в одном пункте. В то же время в другом пункте (где покрытия не происходит) следует определить угловое расстояние от этой звезды. Самые точные способы определения размеров Солнечной системы – наблюдения некоторых астероидов, которые проходят от Земли на небольших расстояниях, и их горизонтальный параллакс может быть велик и измерен с хорошей точностью.

Во второй половине XX в. на смену классическим методам определения расстояний в Солнечной системе пришла радиолокация Луны и планет. Первая успешная радиолокация Венеры была проведена в 1961 г. в СССР, США и Великобритании (Котельников В.А., Петров Г.М. Радиолокация, 1981). Хотя радиолокация – сложный метод исследования, и требуется уточнение времени прохождения радиоволны через межпланетную среду, а также учет релятивистских поправок, обусловленных общей теорией относительности, – все эти трудности в настоящее время преодолены. Например, расстояние «Земля–Луна» определяется с точностью до сантиметров.

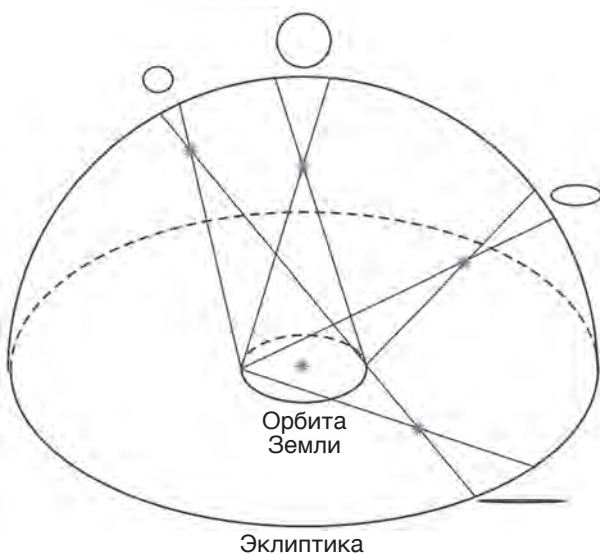
ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАЛЛАКСЫ ЗВЕЗД

Безуспешные попытки

Почти две тысячи лет астрономы пытались обнаружить годичный параллакс звезд. Действительно, в случае справедливости гелиоцентрической системы мира в силу перемещения Земли по орбите на 300 млн километров должны наблюдаться годичные смещения (годовые тригонометрические параллаксы) взаимного положения ближайших звезд. Звезды, находящиеся на разных расстояниях, должны описывать параллактические эллипсы в течение года, большая полуось которых будет зависеть от расстояния до звезды, а эксцентриситет – от эклиптической долготы звезды.

Первые попытки обнаружения этого явления были предприняты Аристархом Самосским в III в. до н.э. В эпоху Возрождения определить параллакс пытались Николай Коперник, Тихо Браге, Галилео Галилей. Каждый наблюдатель

Схема определения годичного параллакса звезд



использовал уникальные методики, и сама история открытия параллаксов похожа на детектив. Дело в том, что тригонометрический параллакс (большая полуось параллактического эллипса) даже у ближайших звезд не превосходит секунды дуги. Под таким углом видна, например, монета достоинством в 1 руб. с расстояния 4 км.

В процессе поиска параллаксов звезд было сделано много важных открытий. В ходе безуспешных попыток английский астроном Джеймс Бредли (Брадлей, James Bradley) при наблюдении звезды γ Дракона (Берри А. Краткая история астрономии. 2-е изд. М.; Л.: Гостехиздат, 1946) открывает в 1727 г. явление астрономической аберрации света. Это явление заключается в изменении направления распространения света при изменении направления движения Земли в течение года, это один из первых наблюдаемых эффектов специальной теории относительности. Наблюдения производились с жестко зафиксированного телескопа, смотрящего в зенит. Отметим, что в последствие такие инструменты стали называться зенит-телескопами и используются до сих пор для определения вариации географической широты места. Звезда γ Дракона (собственное имя – Этамин) на широте Лондона регулярно бывает в зените, что позволяет снизить почти до нуля влияние атмосферной рефракции. Бредли с удивлением обнаружил, что все звезды в течение года испытывают одинаковое изменение эклиптической долготы, описывая эллипс с большой полуосью $20.1''$, аналогичный параллактическому, но направления изменения долготы противоположны ожидаемому от движения Земли! Однако ученый правильно объяснил суть этого явления, связав его с конечностью скорости распространения света, которую

он определил в 308 тыс. км/с, что всего лишь на 3% отличается от истинного значения, в то время как предыдущая оценка Оле Рёмера была примерно на треть меньше. Интересно, что открытие аберрации прямым образом подтвердило движение Земли относительно Солнца со скоростью 30 км/с. Однако задача определения расстояния до звезд так и осталась нерешенной.

Примечательно, что этой же звездой ранее безуспешно занимался и английский изобретатель и естествоиспытатель Роберт Гук, но он не смог завершить наблюдения, т.к. по случайности был разбит объектив его телескопа.

Другой английский астроном Эдмонд Галлей (в более точной транскрипции Хэлли, который был другом Исаака Ньютона и без помощи которого мир бы не увидел книгу «Математические начала натуральной философии»), внес огромный вклад во все естественные науки того времени. Он первый обнаружил собственные движения (proper motions) самых ярких звезд: Альдебарана, Сириуса и Арктура.

Величайший английский астроном Уильям Гершель – первооткрыватель формы Галактики, планеты Уран, инфракрасного излучения – в попытках измерить звездные параллаксы в 1803 г. впервые зарегистрировал орбитальное движение двойных звезд (ранее предполагалось, что двойные звезды являются лишь визуальными, т.е. результатом случайного нахождения вблизи одного луча зрения). Поскольку компоненты двойной звезды находятся от наблюдателя примерно на одинаковом расстоянии, а их яркость может различаться весьма значительно, Гершель сделал правильный вывод, что блеск звезды зависит не только от расстояния (как предполагалась ранее), но и от физических характеристик звезды. Кроме того, Гершель первым определил на основе наблюда-

емых собственных движений звезд, что вся Солнечная система движется в сторону созвездия Геркула.

Наземные тригонометрические параллаксы

Теперь читателю должно быть понятно, как сложен процесс определения параллаксов, сколько существует различных дополнительных причин для изменения координат звезд, и как трудно на их фоне выделить параллактическое смещение. К счастью для наблюдателя, ситуация с определением параллакса немного упрощается, т.к. можно использовать дифференциальные методы наблюдения, измеряя угловые расстояния исследуемой звезды (как правило, яркой, или имеющей большой собственное движение, что является признаком близости) от «звезд фона», которые *a priori* считаются далекими. Такой подход позволяет нивелировать влияние как абберрации, так и рефракции в силу того, что для близких к друг другу на небесной сфере звезд эти эффекты оказывают практически одно и тоже действие.

Первые достоверные измерения звездных параллаксов были опубликованы в 1837–1838 гг. сразу тремя исследователями: русско-немецким астроном и основоположником астрономии в России В.Я. Струве для Веги, немецким астрономом и математиком Фридрихом Бесселем для 61 Лебеда и шотландским астрономом и математиком Томасом Хендерсоном для Альфы Центавра. Хотя за много лет до этого, к 1822 г., Струве в Дерптской обсерватории на территории современной Эстонии (г. Тарту) получил достаточно точные измерения параллаксов нескольких ярких звезд (к примеру, для Альтаира). Кроме того, французский астроном Доминик Араго еще за несколько лет до Бесселя опубликовал

значение параллакса 61 Лебеда с большой погрешностью. Однако результат Бесселя был воспринят мировым сообществом как наиболее достоверный в связи с большим количеством астрономических измерений (более 400). Для сравнения у Струве параллакс Веги был определен всего по 17 астрометрическим измерениям. Работу Бесселя облегчил тот факт, что двойная система 61 Лебеда обладает заметным орбитальным движением. Таким образом, можно было сравнить параллакс для обеих звезд системы. Струве и Бессель использовали рефракторы, построенные немецким оптиком Йозефом Р. фон Фраунгофером.

Визуальные измерения параллаксов и собственных движений являлись крайне трудоемкими. Прогресс в определении годовых параллаксов тормозился значительными систематическими ошибками инструментов и конкретных наблюдателей. К концу XIX в. были определены параллаксы не более сотни звезд, причем результаты для каждой конкретной звезды сильно различались от обсерватории к обсерватории (Hirshfeld A.W. Parallax: The Race to Measure the Cosmos. – Courier Dover Publications, 2013).

Ситуация в значительной мере улучшилась благодаря применению фотографии в конце XIX в. Стандартная методика фотографического определения параллаксов была разработана американским астрономом Фрэнком Шлезингером в 1903 г. Благодаря его усилиям ошибки в определении параллаксов удалось снизить до 0.01". Каталог Шлезингера, вышедший в 1924 г., содержал 1870 надежно измеренных параллаксов (Паннекук А. История астрономии. М.: Наука, 1966). Последний каталог параллаксов The General Catalogue of Trigonometric Stellar Parallaxes (William F. van Altena и др.), полученный в результате наземных фотогра-

фических наблюдений, вышел в 1995 г. и содержит 8994 звезды, параллаксы почти половины из них получены в Обсерватории Йельского университета. Точность определения параллаксов в этом каталоге оценивается как 0.004".

Космические каталоги параллаксов: Hipparcos

Радикальным способом улучшить как точность параллаксов, так и число звезд, у которых они будут измерены, является вывод инструмента в космос. В настоящее время (2024) реализовано два проекта Hipparcos (The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. V. 1–16. ESA, 1997) и Gaia (ESA, Gaia Science Community, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>). Второй проект находится еще в рабочей стадии.

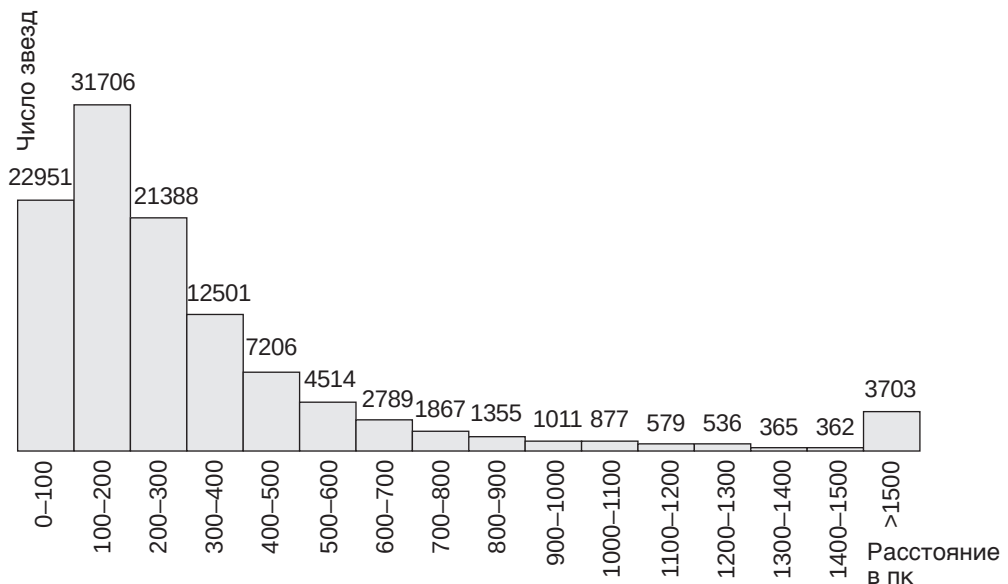
В 1989 г. Европейское космическое агентство (ESA) осуществило запуск космического аппарата HIPPARCOS (High Precision PARallax Collecting

Satellite – «спутник для сбора высокоточных параллаксов») с целью измерения положений, собственных движений и параллаксов звезд на миллисекундном уровне точности. Космический аппарат проработал на орбите 37 месяцев, в течение которых он выполнял астрометрические и фотометрические измерения звезд по заданной программе.

Обработка этих наблюдений, привела к созданию двух каталогов: Hipparcos, содержащего информацию о 117 955 звездах с точностью определения положений, годичных собственных движений и параллаксов на уровне 1 мсд (миллисекунды дуги), и каталога Tycho, содержащего уже свыше 1 млн звезд, с точностью измерения тех же параметров до 25 мсд, но без параллаксов (Цветков А.С. Практическое руководство по работе с каталогом Hipparcos. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2005).

Положения и собственные движения звезд в каталогах Hipparcos и Tycho приводятся в фундаментальной системе

Распределение по расстояниям звезд каталога Hipparcos



ICRS (International Celestial Reference System), реализованной в настоящее время с помощью каталога внегалактических радиоисточников, получившего название ICRF (International Celestial Reference Frame) (Ковалевский Ж. Современная астрометрия / Пер. с англ. под ред. В.Е. Жарова. Фрязино: «Век 2», 2004).

Появление Hipparcos вызвало «бум» статей самой разной направленности. Следует отметить, что, прежде всего, успех миссии Hipparcos связан с определением тригонометрических расстояний 100 тыс. звезд на уровне 1 мсд, что дает точность в 20% до расстояния в 200 пк, и 50% – до расстояний 400 пк. Однако для объектов, находящихся на расстоянии 1 кпк и далее, точность Hipparcos явно недостаточна. Таким образом, диаграмма распределения звезд по расстояниям, построенная по данным Hipparcos, может некорректно представлять картину распределения звезд, находящихся на расстоянии свыше 300–400 пк.

Для уточнения шкалы расстояний во Вселенной для нас самым главным обстоятельством является то, что Hipparcos промерил расстояние тригонометрическим способом до сотен цефеид, пульсирующих переменных звезд, которые играют большую роль в определении расстояний до очень далеких объектов.

До полета Hipparcos фактически ни одна цефеида не была в зоне досягаемости наземных методов, и расстояние до них оценивалось косвенным образом.

Космические каталоги параллакса: Миссия Gaia

Сразу после выхода каталога Hipparcos ESA была начата работа над новой космической астрометрической программой Gaia. Задачи, поставленные

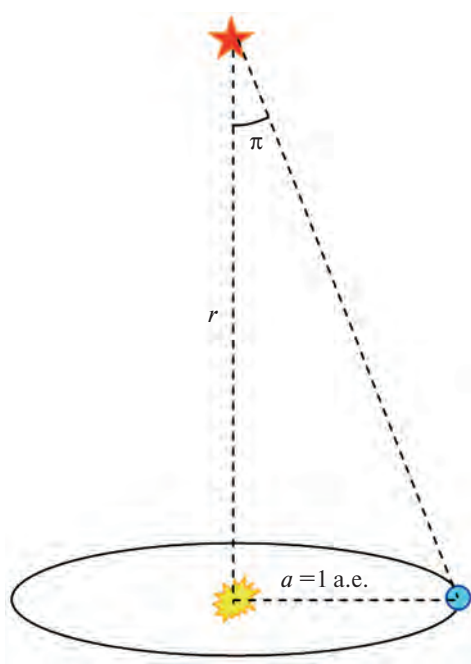
в этой программе, намного превосходят Hipparcos как по точности, так и по объему данных. Аппарат стартовал в 2017 г., а в июне 2022 г. была опубликована уже третья версия каталога Gaia, так называемый Data Release 3 (GDR3), который содержит 1.8 млрд объектов. Наиболее ожидаемый результат финальной версии Gaia – высокоточные индивидуальные параллаксы звезд. Данные о «надежном» параллаксе в этой версии имеют около 1.4 млрд звезд, в то время как 343 млн вообще не имеют данных о параллаксе. Анализ параллаксов показал, что существует значительная доля звезд – 284 млн – с отрицательными параллаксами (что противоречит геометрическому смыслу параллакса). Это значит, что и звездам с малыми положительными параллаксами также нельзя доверять.

Точность параллаксов финальной версии Gaia превосходит точность Hipparcos примерно в три раза (число звезд больше в 10 тыс. раз). Однако у многих звезд (особенно у слабых) относительная ошибка определения параллакса превышает 30% (иногда и 100%), что приводит к крайне неопределенной оценке расстояния.

Работа космического аппарата Gaia еще продолжается, 4-я версия каталога, которая будет базироваться на 6-летнем периоде наблюдений, ожидается не ранее 2025 г., а конечная 5-я версия – не ранее 2030 г. Будем надеяться, что в этих версиях точность тригонометрических параллаксов будет значительно улучшена.

Связь тригонометрического параллакса и расстояния

Тригонометрический параллакс звезды, которые астрономы обозначают буквой π , связан с расстоянием прямоугольным треугольником.



Связь расстояния и параллакса

Тривиальный вопрос о связи тригонометрического параллакса и расстояния на самом деле не является таким простым. Действительно, есть наблюдаемая величина – параллакс π , который определяется в результате обработки наблюдений и приводится обычно со среднеквадратичной ошибкой (σ). Расстояние является обратной величиной к π только в случае высокой точности параллакса. Вообще говоря, согласно методам математической статистики, надежно определенное расстояние (с вероятностью 99.7%) будет заключено в следующем диапазоне:

$$\frac{1}{\pi + 3\sigma} < r < \frac{1}{\pi - 3\sigma}.$$

Очевидно, что при относительной точности параллакса в 30% ($\sigma = 0.3\pi$) и хуже, оценка расстояния становится ненадежной в силу того, что знаменатель правой дроби стремится к нулю, а обратная величина к бесконечности.

Из треугольника, который показывает связь расстояния от Земли до Солнца (a), от центра Солнца до звезды (r) и параллакса (π), следует, что

$$r = \frac{a}{\tan \pi}.$$

Поскольку угол π чрезвычайно мал, то с высокой точностью тангенс угла можно заменить на значение угла, выраженного в радианах. Так как в одном радиане 206 265 угловых секунд, то расстояние до звезды в астрономических единицах (а.е.) выражается формулой (если параллакс измерять в угловых секундах):

$$r[\text{a.e.}] = \frac{206\,265}{\pi["]}.$$

Расстояния до звезд измеряют обычно в пк (или в 1000 пк = 1 кпк). Если числитель в последней формуле положить равным единице, то формула для оценки расстояния упрощается до следующего выражения:

$$r[\text{кпк}] = \frac{1}{\pi[\text{мсд}]}.$$

Таким образом, один парсек получается равен 206 265 а. е. или 30.85 трлн км. Чтобы оценить масштаб этой величины, напомним, что расстояние от Солнца до орбиты Плутона составляет в среднем 39.3 а.е.

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАЛЛАКСЫ ЗВЕЗД

Следует сказать, что сам термин «фотометрический параллакс» (иногда называют «спектральный параллакс») – это астрономический жаргон, указывающий смысл определения расстояния по цвету (спектру) и блеску звезды.

Первая попытка выяснить, насколько далеки звезды путем сравнения их блеска с блеском Солнца (в предположении, что звезды имеют светимость, сравнимую с солнечной), была выполнена голландским физиком, математиком и астрономом Христианом Гюйгенсом. Даже булавочное отверстие в черном экране, освещенное с одной стороны солнечным светом, в темной комнате будет выглядеть значительно ярче звезды. Гюйгенс нашел способ еще в тысячи раз ослабить яркость этого отверстия. По-видимому, он использовал шариковый фотометр (его аналог в XX в. – фотометр советского астронома Н.Ф. Флоря – использовался для наблюдения яркости Луны во время затмений, который составляют несколько полированных металлических шариков, располагающихся на удалении 2–3 м от наблюдателя, фиксирующего на шариках блики от Луны). Сравнивая по памяти блик на шарике с блеском Сириуса, Гюйгенс сделал вывод, что Сириус находится от нас в сотни тысяч раз дальше, чем Солнце.

Остроумный метод определения расстояния до Сириуса, придуманный шотландским математиком и астрономом Джеймсом Грегори, описан в «Началах» Ньютона. Сириус и Сатурн имеют примерно одинаковый видимый блеск, но Сатурн светит отраженным солнечным светом, поэтому его светимость есть произведение трех сомножителей: светимости Солнца, доли солнечного света, падающего на Сатурн,

и его альбедо (доли отраженного света). Зная расстояние от Земли до Сатурна, можно по угловому диаметру (а уже наступила телескопическая эра) вычислить линейный размер Сатурна и определить долю падающего на него света. Труднее оценить альбедо. Ньютон предположил его как у скальных пород (на самом деле 0.43). По оценке Ньютона Сириус должен находиться от нас в 100 тыс. раз дальше, чем Солнце.

Учитывая трудности, с которыми пришлось столкнуться как Гюйгенсу, так и Ньютону, их результаты согласуются удивительно хорошо (Лейзер Д. Создавая картину Вселенной / Пер. с англ. и предисловие Л.П. Грищука. М.: Мир, 1984).

Однако звезды имеют разный блеск не только из-за того, что они находятся на разных расстояниях, но и по причине различия их истинной светимости, которая изменяется в очень больших пределах. Поэтому Сириус на самом деле находится в 500 тыс. раз дальше, чем Солнце.

Фотометрический метод определения расстояний основан на том, что мы каким-то образом должны определить светимость или, что чаще используется, абсолютную звездную величину звезды M . Абсолютная звездная величина M определяется как такая звездная величина объекта, которую он имел бы, если бы был расположен на расстоянии 10 пк от наблюдателя. Сравнив ее с видимой звездной величиной m , можно получить из разности, так называемый модуль расстояния, который выражается в звездных величинах. Используя связь абсолютной звездной величины M , видимой звездной величины m и расстояния до звезды, можно вычислить R в пк примерно как

$$\lg R = 0.2(m - M + 5).$$

Однако, несмотря на кажущуюся простоту, использование метода требует учета нескольких факторов.

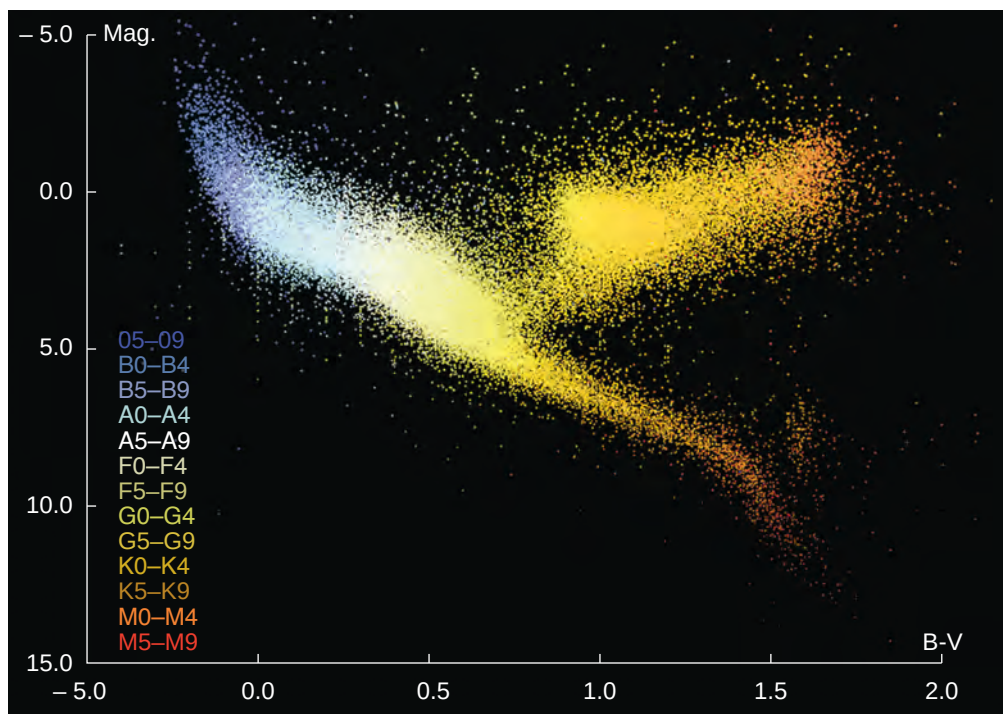


Диаграмма «Показатель цвета (Mag.) – абсолютная звездная величина» для звезд Hipparcos, имеющих относительную точность (B-V) определения параллакса лучше 25%

Во-первых, определение абсолютной звездной величины звезды – это уже сложная задача. Необходимо точно определить положение звезды на диаграмме Герцшпрунга–Рессела. Сделать это по одному показателю цвета невозможно, так как необходимо определить к какому классу светимости относится звезда (главная последовательность, гигант, сверхгигант).

Во-вторых, так как этот метод применяется для определения расстояний до далеких звезд, необходимо учитывать межзвездное поглощение света, приводящее к его ослаблению и покраснению.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

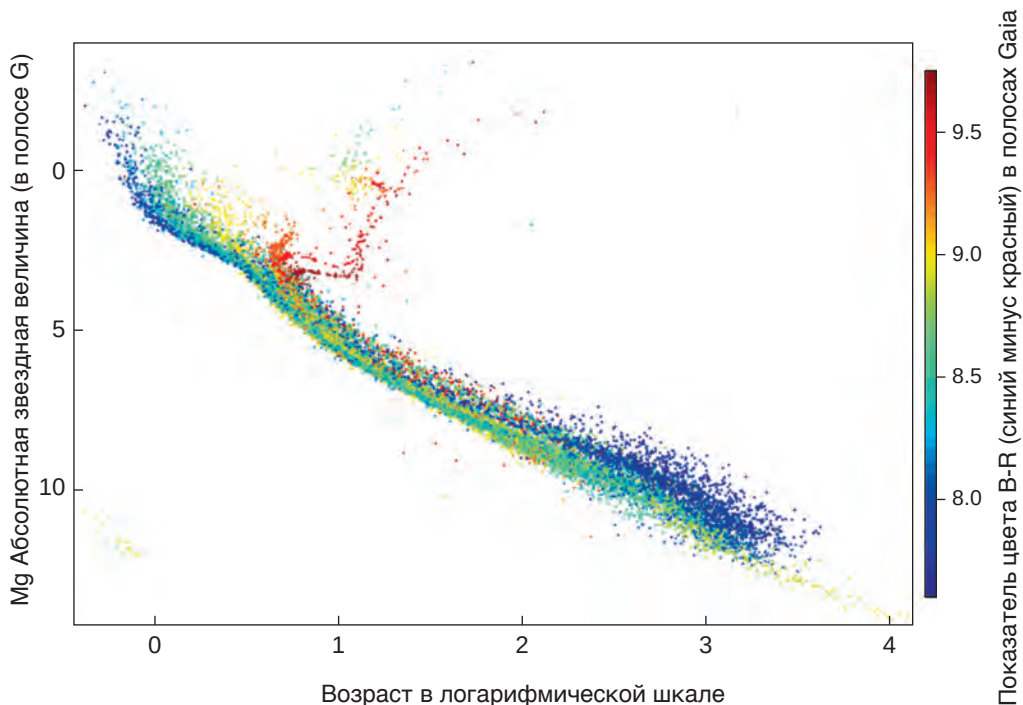
Существуют еще два метода определения расстояний кинематическим способом. Один из них применяется к рас-

сеянным звездным скоплениям (метод группового параллакса), а другой к планетарным туманностям.

Рассеянные звездные скопления встречаются вблизи галактической плоскости. Всего известно более 1.5 тыс. таких объектов в радиусе нескольких кпк от Солнца. Наиболее известно рассеянное звездное скопление Плеяды, удаленное от нас на расстояние 120 пк.

Чтобы отделить звезды, принадлежащие скоплению, от звезд поля, случайно проецирующихся в ту же область неба, можно построить диаграмму Герцшпрунга–Рессела вида «Показатель цвета – видимая звездная величина». Очевидно, что звезды, имеющие сильный отскок от своего места на диаграмме, не принадлежат скоплению.

Если звезды относятся к одному и тому же скоплению в силу его перемещения в пространстве как единой



Обобщенная диаграмма Герцшпрунга–Рессела для 32 рассеянных звездных скоплений по данным Gaia

группы, по законам проекции видимые направления движения его членов будут сходиться в одной точке, называемой «радиант скопления». Тогда, зная угловое расстояние θ между звездой и радиантом, а также лучевую скорость звезды V_r в км/с и ее полное собственное движение μ в мсд/год, можно найти расстояние до звезды R , выраженное в парсеках по следующей простой формуле:

$$R = \frac{V_r \cdot \text{tg} \theta}{k \mu},$$

где $k = 4.378$ – множитель перехода размерностей от мсд/год в км/с $\cdot$ кпк $^{-1}$.

На метод группового параллакса похож способ определения расстояния до планетарных туманностей. Известно, что планетарные туманности представляют собой расширяющиеся, часто

сферические оболочки. В этом случае мы будем наблюдать в их спектрах раздвоение линий из-за эффекта Доплера, соответствующее удаляющемуся и приближающемуся краю туманности. По нему можно определить линейную скорость расширения туманности. Продолжительные позиционные наблюдения покажут, что туманность расширяется и в проекции на небесную сферу. Сравнив эти величины, мы получаем искомое расстояние до туманности по формуле:

$$R[\text{пк}] = 211 \frac{V[\text{км/с}]}{\theta[\text{мсд/год}]}.$$

Впервые этот способ применил в 1960-х гг. американский астроном Вильям Лиллер. К настоящему времени этим методом надежно определено

расстояние всего до полусотни планетарных туманностей. Метод также имеет свои ограничения. Мы должны предполагать изотропность расширения туманности. Туманность постепенно расширяется в пространстве, из-за этого возникают сложности с определением угловых размеров.

Существует довольно много других способов оценки расстояния. Все они основаны либо на среднестатистической яркости объекта, либо на среднем его размере. Перечислить их все не представляется возможным, а их точность невысока.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ПО ЦЕФЕИДАМ

В английском городе Йорке, сразу за знаменитым готическим собором, на небольшом доме установлена табличка, надпись на которой дословно сообщает: *«Из окна казначейства, рядом с этой табличкой молодой глухонемой астроном Джон Гудрайк (1764–1786), который был избран членом Королевского общества в возрасте 21 года, наблюдал периодичность звезды Алголь и открыл переменность звезды δ Цефея и других звезд, таким образом положив основы современного измерения Вселенной».*



Долгое время звездная картина считалась неизменной, и вопрос о возможной переменности блеска отдельных звезд даже не обсуждался. Но открытие Гудрайка и появление методов визуального сравнения блеска звезд, усовершенствованного в 1844 г. немецким астрономом Фридрихом В. Аргеландером, привел к массовому исследованию переменных звезд.

Существуют два класса переменных звезд: затменно-переменные и пульсирующие (Цесевич В.П. Переменные звезды и их наблюдение. М.: Наука, 1980). Переменность первых объясняется тем, что в двойной системе, плоскость орбиты которой близка к направлению луча зрения, компоненты по очереди затмевают друг друга. Классический представитель – β Персея (Алголь). Пульсирующих переменных существует много видов: цефеиды (долго и коротко периодические, типа RR Лиры), звезды типа Миры Кита, новые и новоподобные звезды, катаклизмические переменные и другие типы.

Особый интерес для нашей задачи представляют цефеиды – класс пульсирующих переменных звезд, прототипом которых стала δ Цефея. Цефеиды являются желтыми гигантами и сверхгигантами, среди переменных

звезд они выделяются хорошо изученной зависимостью между периодом и светимостью. Благодаря этой зависимости и высокой светимости цефеиды используются как «стандартные свечи», т. е. как объекты, светимость которых достаточно точ-

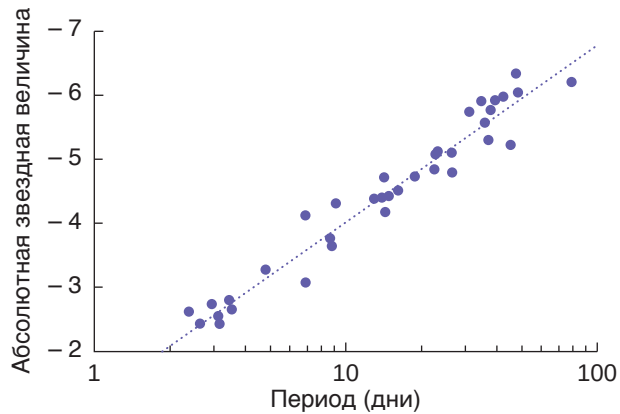
Табличка на доме, из окна которого Джон Гудрайк исследовал переменность звезд. Фото автора

но известна. По наблюдениям цефеид определяются расстояния до удаленных объектов, в том числе и до других галактик, а в начале XX в. с их помощью было доказано существование объектов вне Млечного Пути и был открыт закон Хаббла.

Открытием зависимости «период–светимость» мы обязаны стараниям американского астронома Генриетте С. Ливитт. Директор Гарвардской обсерватории, Эдвард Пикеринг привлек ее к исследованию переменных звезд в Большом и Малом Магеллановых Облаках (БМО и ММО). Ливитт обнаружила 1777 переменных звезд, 47 из которых она отнесла к классу цефеид. Поскольку звезды в Магеллановых облаках находятся от нас примерно на одинаковом расстоянии, это дает возможность изучить зависимости между яркостью звезды и ее периодом. Для 25 цефеид ММО Ливитт удалось показать, что логарифм периода пульсации линейно связан с логарифмом среднего значения светимости цефеиды в оптическом диапазоне.

В то же время масштабный параметр был неизвестен, поскольку точно не было известно расстояние до Магеллановых Облаков. Но уже в 1913 г. датский астроном Эйна́р Герцшпру́нг косвенными методами определил расстояния до нескольких цефеид Млечного Пути. Используя их в качестве калибровки, можно было определить расстояние до любой цефеиды с известным периодом пульсации. Однако более точную калибровку светимости цефеид выполнил аппарат *Hipparcos*, о чем уже упоминалось ранее.

Соотношение между периодом пульсации P и средней абсолютной звезд-



Зависимость «период–светимость» для классических цефеид

ной величиной M , полученное по данным о тригонометрических параллаксах 10 ближайших к Солнцу классических цефеид, есть

$$M = -2.43(\lg P - 1) - 4.05.$$

В этой формуле точность первого эмпирического коэффициента оценивается ± 0.12 , а последнего слагаемого в $\pm 0.05^m$. Однако даже при достаточно точных данных звездные величины и периоды не идеально укладываются в вышеуказанную зависимость.

Несмотря на кажущуюся простоту метода, ему присущи некоторые проблемы. Во-первых, необходимо точно определить тип пульсирующей звезды, во-вторых, неизвестно насколько одинаков закон для звезд нашей Галактики и для тех же Магеллановых облаков. Небольшое различие в содержании тяжелых элементов в звездах может существенно изменить коэффициенты в формулах. Следующая калибровка светимостей цефеид, которая может проверить это обстоятельство, будет сделана по финальным данным каталога *Gaia*, т.к. он должен дать информацию о тригонометрическом параллаксе

Магеллановых облаков и даже отдельных звезд в них. Есть и одно счастливое обстоятельство. Цефеиды – гиганты и даже сверхгиганты, т. е. звезды с очень высокой светимостью, которые могут быть заметны в других галактиках на значительных расстояниях. Действительно, поскольку их абсолютная звездная величина порядка -5^m , т. е. их светимость превосходит солнечную в десятки тысяч раз, их возможно наблюдать на расстояниях в несколько мпк. Именно цефеиды позволили откалибровать в свою очередь закон Хаббла, на основании которого уже оцениваются расстояния до космологических объектов: далеких галактик и квазаров, в которых отдельные звезды, за исключением сверхновых, уже невозможно наблюдать.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ДАЛЕКИХ ГАЛАКТИК

В тех случаях, когда цефеиды в галактиках обнаружить уже не удастся, используются различные оценочные способы.

Например, пытаются выделить ярчайшие звезды в отдаленных галактиках, полагая, что их блеск соответствует блеску самых ярких звезд в более близких галактиках, расстояние до которых удастся определить по цефеидам. В качестве индикаторов расстояний используют вспышки новых и сверхновых звезд. Это так называемые кататизмические переменные. Новые звезды могут повторять свои вспышки, в то время как при взрыве сверхновой звезды происходит ее полное разрушение, а на ее месте остается нейтронная звезда или черная дыра.

Вспышки не любых сверхновых звезд могут использоваться как «стандартные свечи». В максимуме блеска сверхновые, которые возникают при эволю-

ции массивных звезд (так называемые сверхновые II типа), могут иметь различную абсолютную звездную величину, колеблющуюся в значительных пределах в зависимости от исходной массы звезды. Однако существует особый вид сверхновых (сверхновые типа Ia) механизм работы которых несколько иной. Они представляют собой тесные двойные системы, одним из компонентов которых является белый карлик. В результате постепенного перетекания газа со второй компоненты на белый карлик, его масса увеличивается, и как только она достигнет предела Чандрасекара (максимально возможной массы, при которой белый карлик еще устойчив, это величина составляет примерно 1.4 массы Солнца) происходит взрыв сверхновой по типу Ia. Самое замечательное, что в максимуме блеска такие сверхновые имеют одинаковую абсолютную звездную величину (около -19^m) и, следовательно, могут являться «маяками», по которым можно определить расстояние.

Интересно, что в поиске вспышек сверхновых принимали участие школьники разных стран. Существует исследовательская (и компьютерная) программа HOU (Hands On Universe), разработанная Карлом Пеннипакером, в рамках которой любой желающий может обрабатывать снимки галактик и искать в них вспышки сверхновых. Школьники нашей страны также принимали участие в ее работе.

За тонкий метод определения расстояния по сверхновым и сделанным в результате этого открытием ускоренного расширения Вселенной была присуждена Нобелевская премия в 2011 г. Автору данной статьи удалось быть в декабре 2011 года на церемонии вручения премии и прослушать доклад Сола Перлмуттера, Брайна Шмидта и Адама Рисса, на котором были представлены результаты этих исследований.

С. Перлмуттер, Б. Шмидт
и А. Рисс – лауреаты Нобелевской
премии по физике 2011 года.
Фото автора

Вспышки новых и сверхновых звезд (независимо от их типа) часто производят световое эхо – результат отражения света вспышки объекта от облаков межзвездной пыли. Поскольку световая волна распространяется через облако с известной скоростью, подсвечивая разные участки пыли (если вокруг звезды она есть), то, анализируя угловую скорость расширения светового эха, можно достаточно точно определить расстояния до вспыхнувшей звезды. Например, в феврале 1988 г. на ESO (Европейская Южная Обсерватория) было обнаружено световое эхо сверхновой SN 1987A. Оно представляло собой два концентрических кольца вокруг места вспышки сверхновой, которые созданы рассеявшимся на газо-пылевых облаках светом, испущенным сверхновой во время вспышки.

До отдаленных галактик (если в них не наблюдалась вспышка сверхновой, что само по себе довольно редкое событие), фотометрические расстояния можно определять более грубым способом по оценке интегральной звездной величины галактики. По особенностям внешнего вида спиральных галактик часто можно примерно оценить светимость всей галактики. Обычно за абсолютную интегральную звездную величину принимают значение около -20^m , и, исходя из этого, по видимой звездной величине возможно хоть приблизительно сделать выводы о расстоянии до галактики.

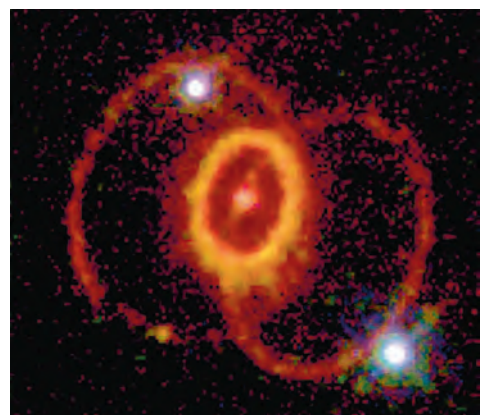
Однако для совсем далеких объектов, находящихся на расстоянии десятки Мпк и далее, вступает в силу



ослабление света, связанное с космологическим красным смещением, которое затрудняет использование фотометрических способов оценки расстояния, но зато открывает новый способ, который успешно работает на расстояниях свыше сотни Мпк и далее.

Красное смещение для галактик было обнаружено американским астрономом Весто Слайфером в 1912–1914 гг. В 1929 г. Эдвин Хаббл открыл, что красное смещение для более далеких галактик сильнее, чем для близких, и возрастает приблизительно пропорционально расстоянию. Это свойство нашей Вселенной стали называть законом красного смещения, или законом Хаббла.

Световое эхо сверхновой SN 1987A



Предлагались различные объяснения этого эффекта, например, гипотеза «старения фотонов». Но только общая теория относительности (ОТО) дает непротиворечивую картину, объясняющую все явления.

Космологическое красное смещение, вообще говоря, не является следствием эффекта Доплера. Этот эффект заключается в изменении длины волны излучения, воспринимаемое наблюдателем, вследствие движения источника излучения относительно наблюдателя. При удалении источника от наблюдателя линии в спектре его излучения смещаются в красную сторону, а при приближении – наоборот, в фиолетовую. Образование космологического красного смещения связано с тем, что свет – электромагнитная волна – летит через пространство, которое расширяется. Вместе с ним расширяется и волновой пакет. Соответственно, изменяется и длина волны.

Необходимо отметить, что на космологическое красное смещение накладывается обычный эффект Доплера, вызванный собственным движением галактики по лучу зрения. Для близких галактик последний может значительно превосходить первый эффект. На больших расстояниях вклад космологического красного смещения становится преобладающим, а на очень больших для правильной интерпретации необходимо, учитывать модель расширения Вселенной (Засов А.В., Постнов К.А. Галактики и скопления галактик // Общая астрофизика. Фрязино: Век 2, 2006. С. 412; Стивен Вайнберг. Космология. Либроком, 2013).

В общем случае для не очень больших красных смещений справедлива линейная формула

$$V = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} c = z \cdot c = H \cdot R,$$

где V – скорость удаления галактики, а точнее, скорость расширения Вселен-

ной на расстоянии, на котором находится галактика; $\Delta\lambda$ – изменение длины волны спектральной линии по сравнению с лабораторной длиной волны λ_0 , их отношение обозначают z , и часто называют просто «красным смещением». c – скорость света; H – параметр Хаббла; R – физическое расстояние до галактики.

Эта формула позволяет для не очень больших красных смещений получить расстояние до объекта, но для этого надо хорошо знать параметр Хаббла. Чтобы получить его значение, необходимо определить расстояние до достаточно далекой галактики (когда ее peculiarная скорость не сильно будет искажать космологическое красное смещение) каким-либо другим способом. Достоверный способ – определение расстояния по цефеидам и сверхновым, а также по данным исследований самого первого света во Вселенной – реликтового излучения. Отметим, что величина параметра Хаббла, полученная первым способом (в ближней Вселенной), существенно отличается от величины, полученной по исследованию ранней Вселенной. Эта проблема до сих пор не решена и носит название проблема Hubble tension.

Вплоть до 1950-х гг. прошлого века внегалактические расстояния сильно занижались, в связи с чем значение H , определенное по этим расстояниям, получилось сильно завышенным. Сам Хаббл определил значение $H = 500 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, что приводило к возрасту Вселенной всего в 2 млрд лет, а это противоречило геологическим данным. В начале 1970-х гг. для параметра Хаббла было принято значение $H = 53.5 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, обратная величина давала возраст $T = 1/H = 18$ млрд лет. Лишь после калибровки расстояний до цефеид, по наблюдениям *Hipparcos*, в 2005 г. значение H принято равным $72 \pm 3 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, и оценка возраста Вселенной стала 13.8 млрд лет.

Фотографирование спектров удаленных источников и измерение положений спектральных линий в них – сложная, трудоемкая работа, требующая крупных телескопов и больших времен экспозиции.

В 1950-х гг. были открыты удивительные объекты – квазары – компактные и чрезвычайно мощные источники радиоизлучения. По современным представлениям, квазары представляют собой активные ядра галактик на начальном этапе развития, в которых сверхмассивная черная дыра поглощает окружающее вещество. При этом выделяется исключительно мощное (иногда в сотни раз превышающего суммарную мощность всех звезд больших галактик) излучение. Потребовались годы, чтобы обнаружить соответствующие им оптические объекты, которые обладали настолько малыми угловыми размерами, что были неотличимы от звезд. Их оптические спектры оказались удивительными, и поначалу линии в их спектрах даже не могли отождествить. Оказалось, что эти линии соответствуют линиям излучения известных элементов, но сильно сдвинутым в красную сторону. Красное смещение самого близкого квазара 3C 273 составляет 0.158, самые далекие квазары могут иметь $z > 10$.

Для вычисления скорости удаления очень далеких объектов простой линейный закон Хаббла уже не применим. Следует пользоваться уравнениями Фридмана, в которых учитывается состав Вселенной (относительное содержание барионной материи, темной материи, темной энергии и излучения). На больших масштабах различают космологическое расстояние, угловое расстояние и фотометрическое (или для полного спектра электромагнитного излучения – болометрическое) расстояния, которые связаны друг с другом.

Космологическое расстояние определяется с помощью лагранжевого (т.е. сопутствующего) расстояния до

этого объекта, которое зависит от закона расширения нашей Вселенной (от масштабного фактора, определяющего линейные размеры нашей Вселенной и скорости его изменения), а следовательно, от того, какое вещество и в каких пропорциях ее наполняет. Фотометрическое расстояние получается путем умножения космологического расстояния на $(1 + z)$, где z – красное смещение далекого объекта, которое характеризует расстояние до него. Такая связь означает тот факт, что энергия фотонов уменьшается из-за расширения. Угловое расстояние до далекого объекта определяется отношением физического размера наблюдаемого объекта к углу, под которым он наблюдается. Это расстояние получается делением космологического расстояния на $(1 + z)$, откуда следует интересный феномен, заключающийся в том, что в расширяющейся Вселенной есть космические объекты с максимальным угловым размером. (Так, для современных значений космологических параметров, полученных по данным космической обсерватории *Planck*, а именно параметра Хаббла $67.81 \text{ км/с} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, относительного вклада темной и барионной материи 0.308, вклада темной энергии 0.692 и незначительного вклада излучения космические объекты с красным смещением 1.588 имеют максимальное угловое расстояние в 1.817 Гпк.)

Когда мы изучаем объекты на космологических расстояниях, надо понимать, что мы видим далекое прошлое, в котором темпы расширения Вселенной были иными. В силу этого процедура определения расстояний дает еще более неопределенные результаты, а потому должна быть подкреплена наблюдениями не только ближнего космоса, но, как мы уже отметили, и ранней Вселенной, а именно поверхности последнего рассеяния – где родилось самое первое излучение во Вселенной и которое наблюдается балонными

и космическими телескопами в радиодиапазоне.

Ответ даже на такой «простой» вопрос: «каков радиус видимой части Вселенной» (сфера Хаббла) уже вызывает затруднения. Ответ: «13.8 млрд световых лет» не верен. Пока свет шел от самых удаленных галактик эти 13.8 млрд лет, Вселенная продолжала расширяться. И радиус наблюдаемой части Вселенной (если бы мы гипотетически остановили ее расширение) – около 42 млрд световых лет. Это и не то расстояние, которое разделяло далекую галактику и нас в момент излучения данного фотона. Расстояние между наблюдателем и галактикой в то время было гораздо меньше. Но это и не такое расстояние, которое потребовалось бы преодолеть, скажем, звездолету, что бы достигнуть этой галактики, так как Вселенная продолжает расширяться, причем ускоренно. Это означает, что космическому аппарату потребуется пройти значительно большее расстояние.

Чтобы уйти от этих неопределенностей, обычно просто говорят, что объект располагается на таком-то красном смещении, т.е. используют наблюдаемые величины. Вообще говоря, согласно современным физическим теориям (как квантовой механике, так и общей теории относительности) следует формулировать физические законы именно в измеряемых величинах.

В настоящее время объектом с максимальным красным смещением является галактика HD1, которая находится в созвездии Секстанта и является самой удаленной от Земли и наиболее ранней (с момента Большого взрыва) галактикой из известных науке по состоянию на 2023 г. Ее красное смещение составляет 13.27, что соответствует сопутствующему расстоянию в 13.5 млрд световых лет и собственному расстоянию в 33.4 млрд световых лет.

Следует помнить, что все измерения этих чудовищных расстояний базируются в конечном итоге на измерении тригонометрических параллаксов звезд и калибровке светимостей цефеид. Возможно, в будущем будут созданы космические радиоинтерферометры с базой сотни миллионов километров. Так, российский космический проект «Радиоастрон» уже позволил получить самое высокое угловое разрешение за всю историю астрономии – 7 микросекунд дуги при базе 340 тыс. км. Такие приборы смогли бы измерить кривизну фронта волны, приходящего от квазара (т.е. измерить его тригонометрический параллакс). Но расстояние до квазара будет связано с параллаксом формулой, учитывающую модель расширения Вселенной.

Благодарности

Автор выражает благодарности студентке астрономического отделения СПбГУ П.Е. Долгошеевой за вопросы, которые побудили написать эту статью, своему сыну В.А. Цветкову за ценные замечания и коллеге, канд. пед. наук В.В. Воронову за тщательную корректуру статьи, а также редактору журнала «Земля и Вселенная» доктору физ.-мат. наук, ведущему научному сотруднику ГАИШ МГУ О.С. Сажиной за неоценимую помощь в доработке статьи.

Литература

1. Вайнберг С. Объясняя мир. Фонд «Династия», 2015.
2. Решетников В. Почему небо темное. Как устроена вселенная. Фрязино: Век-2, 2012.
3. Вайнберг С. Космология. М.: УРСС: Книжный дом «Либроком», 2013.
4. Аванта – Энциклопедия для детей. Т. 8. Астрономия. М.: Аванта+, 2013.
5. Сурдин В.Г., Гиндилис Л.М., Батулин В.А. Астрономия. Век XXI. М.: ДМК-Пресс, 2022.
6. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика. Фрязино, 2011.

ФИЛОСОФИЯ КОСМИЗМА И СТАНОВЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АСТРОБИОЛОГИИ

КОЦЮРБЕНКО Олег Ролландович,

доктор биологических наук, профессор

Югорский государственный университет

ГОВОРОВА Анна Феликсовна,

кандидат географических наук

МГУ им. М.В. Ломоносова, Географический факультет

DOI: 10.7868/50044394824030046

Астробиология рассматривает такие интригующие вопросы, как происхождение жизни, ее поиск и распространение в космосе. Эта научная дисциплина активно развивается в Европе и США. Ведется активная научная деятельность, внедряются новые образовательные программы. В России астробиология развивается в основном за счет деятельности отдельных научных групп, конференции и семинары регулярно проводят несколько ведущих организаций.

Важная особенность астробиологии – ее комплексный характер. Для решения возникающих задач требуется взаимодействие различных наук – биологии, химии, физики, геологии и даже ряда гуманитарных направлений, например, философии. Такая особенность связана с тем, что это научное направление прямо или косвенно затрагивает широкий круг фундаментальных вопросов, например: что такое жизнь (включая разумную жизнь), чем она отличается от неживой материи, каково ее предназначение.

В более широком смысле эти же вопросы рассматриваются в научно-философском направлении – космизме,

к которому относятся многие выдающиеся мыслители, ученые и деятели культуры.

Можно сказать, что современная астробиология с ее системностью и комплексным методологическим подходом, привнесенным из разных дисциплин, зародилась как научное продолжение космизма – философско-мировоззренческого направления, в котором Земля – природа и человек – рассматривались в качестве единого пространства с космосом.

КАК БИОЛОГИЯ СТАЛА «АСТРО-»

В настоящее время в эпоху активного освоения космического пространства биологические науки все чаще включают в цели своих исследований вопросы зарождения жизни, а также возможность существования живых организмов за пределами Земли. Современная космическая биология объединяет как технологические аспекты таких исследований (космическая биотехнология) при проведении экспериментов в условиях космического полета, так и фундаментальные вопросы, связанные



Гавриил Тихов в своем кабинете в Казахстане

с влиянием космических факторов на живые объекты и их способностью существовать во внеземных условиях.

Одним из направлений космической биологии является астробиология, в рамках которой рассматриваются прежде всего такие научные вопросы, как происхождение, существование и распространение жизни во Вселенной. В настоящее время в связи с существенным увеличением фактических данных, полученных различными космическими миссиями по исследованию объектов Солнечной системы, открытием экзопланет в других звездных системах и работой над программами пилотируемых полетов к Марсу, астробиология находится на этапе подъема и расширения границ своей востребованности в научном сообществе.

Одной из главных особенностей астробиологии можно считать глубокую интеграцию различных, прежде

всего, естественно-научных дисциплин: биологии, химии, физики, математики – с информатикой и статистикой, а также философией и культурой.

Сейчас подобная интеграция очень важна, особенно если учесть, как быстро происходит дифференциация направлений различных наук, в частности биологии. Например, ученые, работающие в таких областях, как биоинформатика и микробная экология, использующие совершенно разные методы и приборное оснащение, тем не менее часто объединяются между собой и со специалистами других направлений для решения какой-либо научной задачи. Кроме того, как раз на стыке наук часто происходят важные открытия и появляются новые перспективные технологии.

В современном научном мире астробиология активно входит в образовательное пространство и становится

направлением для создания успешной карьеры для молодых амбициозных ученых.

На основе принципа интеграции образования и науки в США и Евросоюзе уже созданы ассоциации, которые разрабатывают и внедряют учебные курсы по астробиологии в высших учебных заведениях. Наконец, астробиология стремительно входит в медийное пространство и начинает активно влиять на социум, формируя интерес к дальнейшему освоению космического пространства и расширяя общий научный кругозор.

Как наука астробиология возникла в России и ее основателем считается советский ученый Г. Тихов, который ввел этот термин в рамках публикации своих научных работ по изучению космоса и выпустил первую в мире книгу «Астробиология» (1951).

На появление астробиологии как науки и на ее формирование сильное влияние оказало такое направление научно-философской мысли, как космизм. Космизм можно считать мировоззренческой основой астробиологии, которая в свою очередь является методологической основой научного познания мира в рамках учения космизма.

В настоящее время российская астробиология развивается в различных направлениях, приоритетность которых обусловлена историческими, технологическими и географическими факторами.

Россия со своим богатым опытом теоретических и экспериментальных разработок в изучении космоса безусловно способна внести существенный вклад в развитие мировой астробиологии. Участие российских ученых в проектах астробиологического направления способствует процессам более тесной кооперации и интеграции обособленных научных групп в рамках решения общих задач, что в конечном итоге и яв-

ляется одним из основных принципов развития астробиологии, отражая базовую идею всеобщности и целостности нашего мира, преобладающую во взглядах философов-космистов.

КАК ФОРМИРОВАЛИСЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВЯЗИ ЗЕМНЫХ ЯВЛЕНИЙ И КОСМОСА

Представления о космосе как о едином структурном образовании (живом организме) появились еще в античной философии, в частности в учении Платона.

Сам термин «космизм» произошел от греческого «космос» и означает «упорядоченный мир». В позднем Средневековье Джордано Бруно в своей работе «О бесконечности, Вселенной и мирах» (1584) выразил философский взгляд на распространенность жизни за пределами Земли. Позднее, во второй половине XIX – начале XX в. на Западе стали высказываться идеи эволюционного развития применительно к космосу.

Большое влияние на всю европейскую, в том числе русскую, культуру оказал А. фон Гумбольдт с его пятитомным трудом «Космос» (1845–1859), в котором были определены основы немецкого философского космизма. Во Франции это направление развивалось в работах А. Бергсона в концепции «творческой эволюции» (1907). Американский вариант «космической философии» представлен в творчестве религиозного натуралиста Дж. Фiske (термин «философия космизма», 1874) и в работах С. Александера (1920) и ряда других ученых, разрабатывающих концепцию «эмержентной эволюции», в которой подчеркивалось своеобразие каждого нового уровня эволюции.

Русский космизм возник как обобщение наиболее ярких воззрений зарубежных мыслителей и собственной российской идеи и сформировался

Космизм в искусстве

Научно-философские идеи русского космизма легли в основу творчества многих деятелей искусства – художников, писателей и поэтов.

Как писал в личной переписке В.И. Вернадский: «Мы знаем только малую часть природы, только малую частичку этой непонятной, неясной, всеобъемлющей загадки. И все, что мы ни знаем, мы знаем благодаря мечтам мечтателей, фантазеров и ученых-поэтов; всякий шаг вперед делали они».

Получается, что в контексте идей космизма знаменитая триада «Мечта (фантазия) – Теория – Воплощение», без которой невозможно развитие цивилизации, проявлялась особенно ярко (Зеленый, 2024). Искусство, философия и наука развивались вместе и обогащали друг друга идеями.

С К.Э. Циолковским переписывался знаменитый поэт Н.А. Заболоцкий, который много размышлял о единстве мира и роли человека во Вселенной, выражая свои мысли в поэзии.

*Сквозь волшебный прибор Левенгука
На поверхности капли воды
Обнаружила наша наука
Удивительной жизни следы.*

*Государство смертей и рождений,
Нескончаемой цепи звено, –
В этом мире чудесных творений
Сколь ничтожно и мелко оно!*

*Но для бездн, где летят метеоры,
Ни большого, ни малого нет,
И равно беспредельны просторы
для микробов, людей и планет.*

Н.А. Заболоцкий, 1948 г.

Под влиянием «Философии общего дела» Н.Ф. Федорова и философских идей К.Э. Циолковского Николай Заболоцкий написал утопическую поэму «Торжество земледелия» (1933) о Земле, которую населяют разумные животные-творцы.

Идеи космизма проявлялись и в творчестве художников. Можно говорить о том, что в художественном мире того времени произошла революция не менее масштабная, чем в мире науки. И в творчестве деятелей искусства того времени также виден системный подход.

В 1923–1928 гг. в России появилось целое объединение молодых художников «Амаравелла» («ростки бессмертия»), второе название – «космисты». В объединение входили А.П. Сардан, Б.А. Смирнов-Русецкий, П.П. Фатеев, С.И. Шиголев, В.Т. Черноволенко и В.Н. Пшесецкая.

Философия космизма пронизывает творчество таких художников, как М.К. Чюрленис, К.С. Малевич, В.В. Кандинский, К.Ф. Юон, П.Н. Филонов.

Казимир Малевич в 1920 г. говорил о том, что, развивая супрематизм, он на разных этапах своей жизни воплощал идеи космизма, глубоко пронизывающие его искусство (Петрова, 2023).

«Я прорвал синий абажур цветных ограничений, вышел в белое, за мной, товарищи авиаторы, плывите в бездну, я установил семафоры супрематизма. Я победил подкладку цветного неба, сорвал и в образовавшийся мешок вложил цвета и завязал узлом. Плывите! Белая свободная бездна и бесконечность перед вами», – писал Малевич (1919).



*Идея космоса, не знающего пустоты (биокосмоса),
в картине «Симфония космоса» (1925 г.) А.П. Сардана,
группа «Амаравелла»*

Он также размышлял о взаимосвязях, которыми пронизан мир, утверждая, что «ничто, нигде и в живописном мире не растет в бессистемности».

Один из самых известных художников-авангардистов и теоретик искусства XX века Василий Кандинский говорил, что создание произведений – это и есть мироздание, а «живопись есть грохочущее столкновение миров». В своем творчестве он стремился показать рождение нового мира на полотне, показать, как мощно звучит этот процесс. Он добивался звучания своих произведений через динамику цвета. Объединив таким образом разные виды искусства – живопись и музыку, размышлял о единстве мира.

«В конечном итоге мы приходим к объединению сил различных видов искусства. Из этого объединения со временем и возникает искусство, которое мы можем уже теперь предчувствовать – подлинное монументальное искусство», – писал В. Кандинский (1910).

в самостоятельное глубокое научно-философское направление. Ученые и философы-космисты стремились доказать системность законов развития жизни и их взаимосвязь с общими законами мироздания. Важнейшей особенностью космизма в то время был

грандиозный синтез быстро развивающихся наук и их объединение во всеобщую космическую науку о жизни.

В начале XX в. происходило стремительное ускорение научно-технического прогресса. Параллельно в тесном взаимодействии развивались искусство,

философия и наука, которые рассматривали сущность живых организмов, включая человека, и их взаимосвязи с окружающим миром. В то время существовала особая тяга людей к интегральным, наиболее общим идеям единства мира и взаимоотражения друг в друге разнородных явлений.

Религиозно-философское направление русского космизма представлено в работах выдающихся русских мыслителей Н.Ф. Федорова, В.С. Соловьева, Н.А. Бердяева, П.А. Флоренского.

Философы полагали, что у человека и его разумной деятельности особая роль, которая должна заключаться в регуляции сил природы и построении будущего, для чего необходимо познание мира и исследование законов всей вселенной.

Н.Ф. Федоров говорил о том, что «земля открыта со всех сторон, средства же перемещения и способы жизни в различных средах не только могут, но и должны изменяться» и считал, что «в регуляции, в управлении силами слепой природы и заключается то великое дело, которое может и должно стать общим» (Федоров, 1906).

«Философия есть самосознание человеком его царственной и творческой роли в космосе», – писал Н.А. Бердяев (1916).

НАУЧНО-ФИЛОСОФСКИЕ ВЗГЛЯДЫ И КОНЦЕПЦИИ РУССКИХ УЧЕНЫХ-КОСМИСТОВ

Естественно-научное направление решало проблему взаимосвязи человека и космоса в своей парадигме.

Основоположником космизма в России можно считать М.В. Ломоносова, который стал говорить о космосе как части жизни на Земле и о единстве законов природы. Благодаря его работам, в XVII в. понятие о других мирах было

легализовано в русской культуре и стало восприниматься серьезно. В своем учении, которое получило название «Физическая теология», М.В. Ломоносов описывает важность научных исследований для познания мира (Зелёный, 2022).

В конце XIX – начале XX в. естественно-научный космизм получил мощное развитие в работах выдающегося русского ученого К.Э. Циолковского, который оказал огромное влияние на последующую организацию космических исследований и предложил концепцию распространения жизни в космосе. В своих многочисленных работах, ключевыми из которых являются «Живые существа в космосе», «Живая вселенная» (1923) и «Космическая философия» (1935), он развивал свои идеи о жизни как вселенском феномене, связи живых организмов с космическими явлениями и неизбежности распространения жизни в космосе.

В философском трактате «Монизм Вселенной» (1925) Циолковский пишет: «На всех планетах с атмосферами в свое время проявились зачатки жизни. Но на некоторых из них, в силу условий, она пышнее и быстрее расцвела, дала существам техническое и умственное могущество и стала источником высшей жизни для других планет Вселенной. Они стали центрами распространения совершенной жизни».

«Почему бы на них (других планетах солнечной системы. – *Авт.*) не зародиться жизни, как она зародилась на Земле! Правда, на отдаленных от светящегося светила планетах холодно, а на близких к солнцу – жарко. Но планет у каждого солнца множество. Некоторые из них должны находиться на благоприятном расстоянии от светила и потому должны быть пригодны для жизни. Светило и расстояние планеты от него дает всем планетам удобные моменты для развития жизни <...> Эти «моменты» могут

Научно-философский вклад российских ученых в развитие астробиологии

Имя	Дата	Научный вклад и основные публикации
Циолковский К.Э.	1895–1935 1895 1923 1925 1935	Космическая философия и теоретические вопросы космонавтики «Живые существа в космосе» «Живая вселенная» «Монизм Вселенной» «Космическая философия»
Умов Н.А.	1902 1916	Концепция антиэнтропийной сущности жизни Собрание сочинений профессора Николая Алексеевича Умова
Чижевский А.Л.	1915–1930 1924 1926 1930	Гелиобиология «Физические факторы исторического процесса» «Космическая радиация как биологический фактор. Результат экспериментальных исследований о влиянии космической радиации – солнечной и звездной – на клетки и ткани» «Эпидемические катастрофы и периодическая деятельность Солнца»
Опарин А.И.	1924–1977 1924	Теория происхождения жизни (первичный бульон, коацерваты) «Происхождение жизни»
Вернадский В.И.	1926–1940 1926 1931 1840	Учение о биосфере. Концепция трансформации геосферы живыми организмами. Биогеохимия. «Биосфера» «Об условиях появления жизни на Земле» «Биогеохимические очерки»
Ефремов И.А.	1950	«Тафономия и геологическая летопись»
Холодный Н.Г.	1944 1947	Антропокосмизм «Мысли натуралиста о природе и человеке»
Тихов Г.А.	1941–1953 1945 1949 1951 1953	Астрофизические исследования Марса Термин «Астроботаника» Книга «Астроботаника» Термин «Астробиология» Книга «Астробиология»

продолжаться миллиарды лет, чего достаточно для зачатия и развития организмов. <...> Зачавшаяся в удобный момент жизнь не погибает при изменении условий, так как эти изменения происходят постепенно и жизнь успевает к ним приспособиться» (Циолковский, 1925).

Большой вклад в развитие теории космизма и изучение явлений природы внес русский физик Н.А. Умов, выдвинувший теорию негэнтропийной сущности жизни, ее способности сопротивляться распаду, повышая уровень организованности. Большое значение он придавал философскому осмыслению физики.

Можно говорить о том, что этот ученый является одним из создателей современной биофизики (Твердислов, 2013). Умов развивал идею о том, что противоречия между живой и неживой природой не существует, и необходимо стремиться к тому, чтобы увидеть те общие законы, которым подчиняется живая и неживая природа.

«Живую материю можно уподобить горячей лампе, которая сама добывает сжигаемое масло». «Живое – это состояние устойчивого неравновесия», – писал ученый.

«Стройность есть необходимый признак живой материи. Эволюция живой материи в общих чертах увеличивает количество и повышает качество стройностей в природе» (Умов, 1916).

Под стройностью он понимал регулярность в диссипативных самоорганизующихся системах – свойство биологических систем, о которых ученые будут говорить уже намного позже.

Большое значение для развития научного направления космизма имели работы А.Л. Чижевского, основоположника гелиобиологии – науки о взаимосвязи живых организмов с солнечной активностью и другими космическими воздействиями.

Он предложил смелую гипотезу о связи солнечной активности со вспышками эпидемий (Эпидемические катастрофы и периодическая деятельность Солнца, 1930), о влиянии солнечных циклов на поведение общества и исторический процесс (Физические факторы исторического процесса, 1924). Чижевский много размышлял о единстве всех явлений во Вселенной, для этого применял синтетический подход, пытался связать разные научные дисциплины и методы, естественные науки и гуманитарные.

«Правильная периодичность или повторяемость явлений в пространстве или во времени – есть основное свойство мира, которым владеют одни и те

же законы, распространяющиеся равно на все части природы, независимо от того, как делит их человек: и неорганическая и органическая материя со всею своею психическою деятельностью, подчинена одним и тем же, общим для всей вселенной, принципам».

«Задача синтетического суждения в том именно и состоит, чтобы без страха перед судом критики вступать на путь широких обобщений и находить зависимость между явлениями, принадлежащими, как может показаться, к совершенно различным областям знания и жизни» (Чижевский, 1924).

Одним из первых в мире А.Л. Чижевский стал проводить исследования в области космической биологии. Его статья «Космическая радиация как биологический фактор. Результат экспериментальных исследований о влиянии космической радиации – солнечной и звездной – на клетки и ткани» была опубликована в 1926 г., правда только во Франции.

«Обложившись статьями о пентрантной радиации, как в те времена называли космическую радиацию, я весь остаток майских дней 1926 года посвятил обдумыванию предложения К.Э. Циолковского (рассмотреть обстановку, которая будет окружать космонавтов в реактивном корабле. – *Авт.*). Никаких приборов для учета космической радиации у нас не было... Поэтому надо было использовать биологические детекторы космических лучей. Хотя научная литература ничего не говорила об отзывчивости живой ткани на космические излучения» (Чижевский, 1995).

Огромное влияние на научно-философское представление об организации живого мира, и в частности, на развитие астробиологии, сформировавшейся позже как наука, оказало учение В.И. Вернадского (Маров, 2013), который развивал концепцию биосферы, определял жизнь как космическое явление, отмечал определяющее влия-

яние жизненных процессов на геологию планеты, ее огромный преобразующий потенциал и выдвигал идеи прихода человечества к автотрофности как принципиально новому и наиболее перспективному способу обмена веществ с окружающей средой.

Большим вкладом Вернадского в мировую науку было создание учения о биосфере о важнейшей преобразующей функции жизни на планете. Основные положения этой концепции были сформулированы ученым в 1916–1926 гг. Открытие существования биогеохимической энергии живого вещества и биогеохимических функций жизни позволило Вернадскому сделать вывод о том, что именно живое вещество является мощнейшей геологической силой, которая сформировала и продолжает определять современный облик Земли.

Вернадский рассматривал биосферу не просто как совокупность живых организмов, а как единую динамическую систему, которая существует в тесном взаимодействии с космосом. В этой системе жизнь (живое вещество) находится в постоянном взаимодействии с косным веществом (минеральным). Вернадский полагал, что жизнь определяет химизм, миграцию и дифференциацию химических элементов во всех оболочках планеты.

В книге «Биосфера», которая вышла в 1926 г., эту мысль В.И. Вернадский высказал впервые, и она показалась современникам очень смелой: «На земной поверхности нет химической силы более постоянно действующей, а потому и более могущественной, чем живые организмы, взятые в целом <...> Жизнь состоит в значительной мере в извлечении из окружающей среды определённых химических элементов, проведении их через соединения или жидкости организма и их выделения вновь в окружающую среду, нередко в виде новых соединений».

Уже позже, в 1940 г. в «Биогеохимических очерках» Вернадский, развивая учение о биосфере, суммирует свои идеи о новом научном направлении – биогеохимии (хотя размышлять об этом он начал еще в 1917 г.). Биогеохимия, по определению самого ученого, «изучает химический состав живых организмов, участие живого вещества в процессах миграции, распределения, рассеяния и накопления химических элементов».

На основе своего учения о биосфере Вернадский сформировал не только такие новые направления на стыке наук, как геохимию и биогеохимию, благодаря его идеям появилась астрохимия и радиохимия (Маров, 2013).

В ряду научных концепций, повлиявших на развитие астробиологии, особое место принадлежит А.И. Опарину, выдвинувшему в 1924 г. биохимическую гипотезу происхождения жизни. Согласно Опарину, на первом этапе в условиях восстановительной атмосферы древней Земли происходил абиогенный синтез органических соединений.

Их постепенное накопление в древнем океане привело к образованию так называемого «первичного бульона», в результате полимеризации и постепенного усложнения возникли сложные органические соединения (белки, липиды, нуклеиновые кислоты) и образовывались «коацерваты» – комплексы органических соединений, обособленные от воды и способные к дальнейшему «росту» в размерах. Объединение коацерватов с нуклеиновыми кислотами привело к образованию примитивных самовоспроизводящихся живых организмов – пробионтов, которые были прототипами первых живых одноклеточных организмов. Впоследствии некоторые этапы образования простых и сложных органических соединений были экспериментально подтверждены в работах С. Миллера, Дж. Оро, Л. Орджела и С. Акабори и др.



А.И. Опарин со старшим научным сотрудником А.Л. Курсановым в лаборатории энзимологии, 1938 год

Опарин не относил себя к космистам, однако в своих трудах отмечал важную роль вопроса происхождения жизни, не только для науки, но и в философском смысле. «Это одна из важнейших мировоззренческих проблем человечества, в которой, как в фокусе, собираются все научные знания», – говорил ученый.

Его теория оказала огромное влияние на развитие мировой астробиологии и вошла в учебники по биологии как классическая концепция появления первых живых организмов на Земле.

Сам Опарин рассматривал свою теорию в более широком аспекте. Он писал: «В настоящее время теория происхождения жизни является не только фундаментом для создания теоретиче-

ской биологии для раскрытия сущности жизни и исследований по эволюционной биохимии, но и теоретической основой космохимических исследований и поисков жизни на различных телах Вселенной. Она является фундаментом и для познания сущности жизни».

Идеи космизма также содержались в деятельности писателя и ученого-палеонтолога И.А. Ефремова, создавшего на стыке геологии и палеонтологии науку тафономию (изучение распределения ископаемых останков, позволяющее составить представление о функционировании древних биоценозов) и признававшего неразрывное единство всех наук и необходимость междисциплинарных исследований.

Философия космизма оказала влияние на деятельность ученого-биолога Н.Г. Холодного и, в частности, на его учение антропокосмизма, в котором он рассматривал человека как одну из органических частей мира, а естественно-научные знания как ключ к пониманию места человека в природе и его взаимоотношении с космосом.

Холодный говорил о постоянном ощущении человеком своей органической, неразрывной связи со всем космосом. И если антропоцентризм, по его мнению, как возвеличивание человека над природой, был реакцией на страх перед ней и желание подчинить себе ее силы, то у антропокосмизма совсем другой уровень взаимодействия человека и космоса – более созидательный и позитивный (Холодный, 1944).

Одним из самых знаменательных событий в истории исследования внеземной жизни была научная деятельность академика Г.А. Тихова, который, изучая возможность существования растительности на Марсе, впервые ввел термин «астроботаника» в 1945 г., а затем термин «астробиология» в 1951 г.

«В настоящее время астроботаника вышла из рамок изучения только рас-

Иллюстрация и отрывок текста в журнале «Наука и жизнь» (1951 г.), где Г.А. Тихов впервые анонсировал создание новой науки астробиологии



тельности других планет и превратилась в новую науку – астробиологию», – писал Тихов в статье, опубликованной в ноябре 1951 г. в журнале «Наука и жизнь».

В последствии он выпустил первые книги в рамках этих направлений: «Астроботаника» (1949) и «Астробиология» (1953), в которых описал основные научные принципы развития этих дисциплин, что фактически ознаменовало начало нового научного направления, которое в настоящее время так быстро развивается. В своих работах Тихов выдвигал идеи о чрезвычайно высокой приспособля-

емости жизни к различным неблагоприятным условиям на планетах и, по существу, обосновал важность изучения экстремофилов в качестве модельных организмов в рамках астробиологии.

«...жизнь есть явление чрезвычайно настойчивое и упорное. Она может существовать и в условиях, сильно отличающихся от земных. Жизнь может и должна существовать не только на планетах солнечной системы, но и на планетах, которые, несомненно, движутся около бесчисленного множества звезд, встречающихся в бесконечной Вселенной», – писал Тихов.

«Астроботаника»

Астроботаника основана на вере.
В обсерваториях ночами тихо-тихо.
Астроботаника – про астры на Венере.
Средь академиков всех лучше старый Тихов.

Фотографированье звезд на расстояние
В десятки светолет не труд, а мука:
Над телескопами качнется мирозданье –
И затуманится прекрасная наука.

У круглой линзы радужный мениск –
Как у прозрачной жидкости в сосуде.
Астроботаника предполагает риск
Гипотез, призрачных уже по самой сути.

Выходим в ночь, распахивая двери,
К ночному небу обращаем лица:
Рычат вверху неслыханные звери,
Трясет хвостом невиданная птица.

Какие формы ожидают нас!
Быть может, не растения, а нечто,
Чему и нет названия сейчас,
Так призрачно оно и быстротечно.

А.С. Кушнер, 1962

В 1947 г. для исследования жизни на других планетах Гавриил Тихов создал первый в мире Сектор астроботаники (при Академии наук Казахстана).

После этого на ученого и новое научное направление обрушился шквал критики. В 1952 г. президиум АН Казахской ССР организовал широкую дискуссию для критического обсуждения работы сектора и его исследований внеземной жизни.

Сторонники Тихова говорили о необходимости создать в России новую обсерваторию с самым современным оборудованием, преобразовать сектор астроботаники в Планетарный институт и привлечь к астробиологическим исследованиям представителей смежных научных дисциплин. Оппоненты, в том числе И.С. Шкловский, считали, что все идеи Тихова – большое заблуждение.

Известно, что в то же время в Казахстан к Тихову приезжал известный американский астроном Альберт Уилсон. Он высоко оценил исследования Тихова и очень заинтересовался его идеями. Уилсон сказал: «Америка слишком поздно признала Циолковского, и сейчас мы исправляем ошибку тем, что признаем идеи Тихова».

Вскоре после своей поездки в Казахстан, Уилсон организовал в США первый в мире семинар по астробиологии.

В России после смерти Гавриила Тихова в 1960 г. сектор астроботаники был расформирован. На долгое время астробиология была забыта.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРИРОДНЫМ ЯВЛЕНИЯМ КАК НАУЧНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ КОСМИЗМА

Формирование концепции системности в природе по существу может органично рассматриваться в рамках уче-

ния космизма, поскольку в их основе одна идея – «все связано со всем».

Идея рассматривать объект исследования как целостную систему упоминается еще в античной философии и науке. Например, в натурфилософском учении Анаксагора (ок. 500–428 г. до н.э.) о неразрушимых элементах, из которых происходит всякое возникновение благодаря соединению качеств этих элементов. Другой пример – системное мировоззрение Аристотеля (384–322 гг. до н.э.).

Позднее, в Средние века, формируется концепция системной организации знания, которая позже получает наибольшее развитие в немецкой классической философии и, в частности, в работах о системной связи живой и неживой природы И. Канта (1724–1804) и необходимости субординации и координации в системе И.Г. Ламберта (1728–1777).

В биологии первые идеи системной организации связывают со взглядами древнеримского медика Клавдия Галена (ок. 130 – ок. 217 г.), который постулировал разную системообразующую функцию артериальной и венозной крови в организме человека.

Намного позже попытки систематизировать природу в целом и исследовать влияние на организмы факторов окружающей среды появились в работах К. Линнея (1707–1778), Ж.Б. Ламарка (1744–1829), Ч. Дарвина (1809–1882) и В.И. Вернадского (1863–1945).

В начале 1920-х гг. австрийский биолог Л. фон Берталанфи начал изучать живые организмы как системы и обобщил свои выводы в книге «Современная теория развития» (1929). Именно Берталанфи считается разработчиком системного подхода к изучению биологических организмов, хотя у него было несколько предшественников, в частности, русский ученый А.А. Богданов (1873–1928), также разрабатывающий теорию организации.

В 30-е гг. XX в. Бергаланфи создал общую теорию систем – научно-методологическую концепцию исследований объектов, включая живые организмы, которые рассматривались как системы, постоянно обменивающиеся со средой веществом и энергией. В рамках этой теории, система – это совокупность взаимодействующих элементов, которые могут, в свою очередь, являться системой более низкого уровня. Структура системы – это совокупность устойчивых связей между элементами. Свойства объекта как целостной системы определяются не простым суммированием свойств его отдельных элементов, а особыми системообразующими эмерджентными свойствами его структуры.

Дальнейшее развитие теории систем привело к возникновению системной биологии. В настоящее время это научное направление обрело мощнейшую экспериментальную базу с развитием различных молекулярно-биологических и генных технологий и получением огромного количества данных, которые требуют обработки и систематизации.

В целом, системный подход ориентирован на изучение объекта как целостности, на выявление его элементов и типов взаимодействия между ними и обобщения полученных результатов в виде единого теоретического представления.

Системная организация определяется на разных масштабах нашей Вселенной и является важнейшим ее свойством. Системность и целостность являются важнейшими признаками и живых объектов. А биологические системы – одни из наиболее сложных систем по типу организации.

Необходимо отметить выдающиеся работы российского академика Г.А. Заварзина, который активно использовал основные принципы системного под-

хода при изучении микробных сообществ и их роли в глобальной экологии (Заварзин, 2011).

В продолжении идей Вернадского о неизменности и непрерывности биогеохимических процессов в течение геологического времени Земли, Заварзин рассматривал микроорганизмы как единицы живого вещества. Объединенные в сообщества на основе трофических взаимодействий микроорганизмы представлялись как сложные биологические системы, вовлеченные в различные биогеохимические циклы элементов на Земле.

Считается, что бактерии и археи (прокариоты) представляют собой первую устойчивую систему в биосфере, в которую последовательно включаются все остальные живые существа. Формирование микробного сообщества происходит по системному принципу целесообразности. Включение того или иного организма в его состав зависит не от того, насколько высоким потенциалом этот организм обладает в отношении присущего ему метаболического процесса, а от того, насколько выгодно его включение самому сообществу в отношении увеличения потенциала сообщества в целом при его функционировании в окружающей среде и повышения его устойчивости как системы.

Одновременно микроорганизмы, включенные в сообщество, вступают в кооперативные взаимовыгодные отношения. Таким образом, можно сказать, что микробное сообщество возникает на основе неदारвиновских законов и главной движущей силой при его формировании является кооперация, а не конкуренция, последняя играет лишь регулирующую роль. А успешное функционирование сообщества зависит от согласованной работы всех его элементов – различных микробных групп.

Применение системного подхода к изучению биологических систем связано с разработкой концепции структурных уровней организации живой материи. Для наиболее полного анализа системы необходимо прежде всего определить ее иерархический уровень и связи с другими системами. Взаимодействие различных систем, характеризующих организацию живой материи и их связь с окружающей средой, настолько тесное, что комплексное изучение какого-либо системного явления требует определения его положения в иерархическом ранге соподчиненных систем, определения основных межсистемных и внутрисистемных взаимодействий.

Наиболее точной теоретической концепцией такого подхода является иерархический холизм, который применительно к биологии утверждает, что биологические явления или процессы в природе объединяются в системы, каждая из которой может являться в свою очередь элементом другой системы более высокого ранга, а точность описания изучаемого объекта связана, прежде всего, с корректным определением действительной системы, в которой этот объект функционирует.

Так, повышение уровня системы происходит в следующей последовательности: биомакромолекула – микроорганизм – микробное сообщество – экосистема – биосфера (биосистема высшего уровня в пределах планеты). В этой связи устойчивость микробного сообщества как системы зависит от сохранения ее функциональной значимости для окружающей экосистемы, в которой микробное сообщество является одним из ее элементов. Эволюция же какой-либо системы рассматривается как средство достижения ее соответствия системе более высокого уровня, меняющейся во времени в зависимости от различных внутренних и внеш-

них факторов. Соответственно, понятие целесообразности как условия существования объекта вновь появляется в поле зрения биологов.

С точки зрения Заварзина, происхождение жизни также должно рассматриваться как системное явление. Он постулировал, что происхождения жизни должно быть неразрывно связано с происхождением микробного сообщества, поскольку только такая биологическая система может быть устойчивой в природе. Индивидуальный организм может выживать только как элемент в составе сообщества. Поэтому микробные системы как базовые биосистемы должны быть ключевым объектом поиска в рамках концепции внеземной жизни.

Эта концепция возникла как продолжение учения В.И. Вернадского, который в статье «Об условиях появления жизни на Земле» в 1931 г. впервые высказал мысль о том, что жизнь могла возникнуть только лишь в совокупности с особыми геохимическими условиями.

«Первое появление жизни при создании биосферы должно было произойти не в виде одного какого-нибудь вида организма, а в виде их совокупности, отвечающей геохимическим функциям жизни. Должны были сразу появиться биоценозы», – писал Вернадский.

Получается, что многообразие уровней структурной организации живой материи определяет дифференциацию биологии, при которой каждый такой уровень более детально изучается соответствующей биологической наукой. В тоже время системный подход способствует интеграции отдельных биологических дисциплин, предлагая более общий взгляд на различные явления, которые могут быть поняты только при их совокупном рассмотрении в рамках различных биологических направлений.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В АСТРОБИОЛОГИИ

Астробиология является прекрасным примером науки, в которой интегрируются различные дисциплины. И не только биология с ее совокупностью различных направлений, но также химия, физика, геология, астрономия и ряд других наук, которые необходимы для решения основных задач, связанных с поиском и исследованием феномена жизни.

Все основные вопросы, на которые нацелена астробиология, требуют углубленного системного подхода. Эта очевидность возникает из того факта, что для целостного понимания явления жизни, ее возникновения, роли и возможности распространения в космосе необходимо рассматривать ее земной феномен на уровне всех возможных биосистем и их взаимодействующих элементов.

Биосфера Земли – единственная известная биосистема планетарного масштаба, которая может рассматриваться в качестве модели при поиске внеземной жизни. Соответственно, все рассмотренные выше системные взаимодействия и свойства необходимо учитывать при обсуждении возможных обитаемых внеземных экосистем.

Доминирующая в настоящее время концепция обитаемости включает

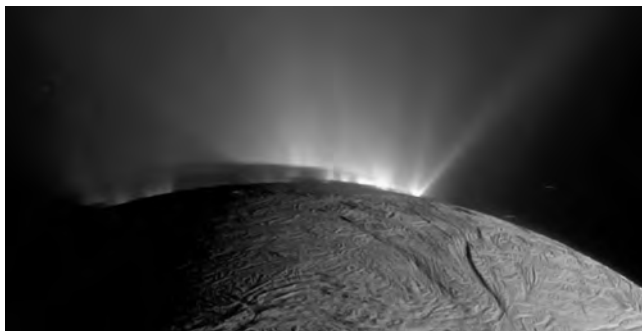
обязательное наличие четырех необходимых факторов для существования жизни: основных биогенных элементов CHNOPS, источников энергии, благоприятных физико-химических условий и растворителя (вода) (Cockell, 1999). Если эти условия выполняются, то такая экосистема потенциально может быть обитаема.

Зона обитаемости различных планет рассчитывалась по их расстоянию от звезды, излучение которой принимается в качестве основного источника энергии для живых организмов, и представляла собой область, в которой физико-химические условия, и прежде всего, температурные условия, позволяли существование жидкой воды на поверхности.

Впоследствии с получением данных о возможном существовании подповерхностных океанов на различных спутниках внешних планет солнечной системы, а также гипотетической жизни в облачном слое Венеры понятие зоны обитаемости существенно расширилось (Ананьева и др., 2020).

Уже давно рассматривается возможное наличие биосистем в подледных океанах спутников Юпитера, прежде всего Европы и Энцелада, в которых жизнь может, в частности, поддерживаться внутренней энергией этих небесных тел (Noack et al., 2016; Nimmo, Pappalardo, 2016; Shematovich, 2018).

Гейзеры на Энцеладе: вода из подледного океана, в котором возможна жизнь, выходит на поверхность. Снимок получен аппаратом NASA Cassini в 2005 г. Источник: NASA/JPL



Гипотетическая облачная система Венеры представляет новый тип экосистем, где существенным моментом для обеспечения энергией микробного сообщества может являться интенсивный обмен веществом между раскаленной поверхностью планеты и облаками. Более того, высокие температуры на поверхности Венеры создают в то же время умеренные, вполне приемлемые для развития организмов земного типа температурные условия на достаточно больших высотах.

Таким образом, в современной концепции зоны обитаемости классический поверхностный тип жизни, который также включает подповерхностный (как часть верхнего слоя земной коры) и океанический, дополняется достаточно четко локализованными закрытыми экосистемами, такими как эндогидросферные и атмосферные (аэрогеохимические).

Существование обширных или ограниченных по объему, не зависящих от поверхности планеты экосистем поднимает вопрос об их устойчивости. Поскольку главными критериями устойчивости глобальной биосистемы является вовлечение живых организмов в работу биогеохимических циклов и их замкнутость, то важнейшим индикатором существования жизни является анализ геохимической и гидрологической ситуации на планете в отношении существования потенциала возможностей для развития жизни. Чем глобальнее циклические процессы, в которые вовлечены живые организмы, тем устойчивее биосистема. В этой связи вновь становится актуальным изучение важнейшего тезиса Вернадского о фундаментальной биогеохимической роли жизни для преобразования заселенной ей планеты.

Таким образом, при поиске внеземной жизни существенную роль должен играть анализ возможных геохимиче-

ских циклов элементов на исследуемой планете и возможность интеграции в них гипотетических простейших биологических организмов. Интеграция, в свою очередь, должна быть основана на термодинамической эффективности возможных биогенных реакций, которые микроорганизмы могут использовать для получения энергии, а также с оценкой возможной трофической структуры гипотетического микробного сообщества и его физической организации на уровне микроэкопиш.

Для такого подробного анализа существует достаточно большое количество накопленного материала при исследовании земных биосистем. Методологически этот анализ может производиться путем наложения метаболического и биохимического потенциала земных организмов на экстремальные условия на космических телах в Солнечной системе с целью нахождения приемлемых зон обитания для земных организмов в рамках их земных пределов существования, включая также их возможную адаптацию к новым, запредельным для них физико-химическим условиям, при учете потенциала их молекулярно-генетического аппарата.

Поскольку в настоящий момент нет никаких данных о существовании внеземной жизни, астробиология направлена на разработку методов ее поиска, в которой главным аспектом являются поиск биосигнатур – каких-либо соединений, процессов или структур, которые указывают на настоящую или прошлую активность живых организмов. В этом отношении системный анализ биологических систем на Земле может внести важный вклад в определение типа таких биосигнатур и их связи с проявлениями гипотетической жизнедеятельности на разных уровнях.



Типы биосигнатур (биомаркеров) очень разнообразны. Они включают химические, морфологические, осадочные и изотопные процессы и структуры биогенной природы, которые могут детектироваться и указывать на прошлую или настоящую жизнедеятельность живых организмов

На каждом системном уровне определяются свои биосигнатуры. Идеально было бы зафиксировать их на нескольких уровнях, что дало бы больше доказательств наличия биологической активности на изучаемой планете. Тем не менее в силу ограниченности технических возможностей отдельной космической миссии исследователи, как правило, разрабатывают методологию детекции лишь некоторого числа возможных биосигнатур.

Очевидно, что тип детектируемой биосигнатуры может дать прямые (биомакромолекулы или клетки) или кос-

венные (газовый состав, геологические процессы) доказательства присутствия внеземной жизни на космическом теле. Однако в случае поиска прямых доказательств необходимо принимать во внимание, что внеземные формы жизни могут существенно отличаться от земного типа жизни и, следовательно, не обязательно будут детектироваться методами, разработанными для земных организмов.

Поэтому важно искать наиболее общие принципы и особенности живых организмов, которые могли бы быть применены не только к земной форме

жизни. Соответственно, четыре основных критерия обитаемости необходимо рассматривать в более широком аспекте.

Так, несмотря на то, что химические элементы являются универсальными, их соотношение и роль в живом организме могут быть иными в другой, отличной от земной системе. Аналогично, такие источники энергии как фото- и хемосинтетические процессы потенциально могут быть представлены совершенно новыми биохимическими реакциями.

Более того, гипотетически вода как растворитель может быть замещена другим соединением, намного более распространенным на другой планете, например, метаном на Титане (Taubner, 2018) или даже раствором серной кислоты в облачном слое Венеры (Seager, 2024).

В этой связи имеет смысл изучать любые признаки термодинамического дисбаланса на планете. Например, сопряженные окислительно-восстановительные пары, взаимодействия в химических реакциях в которых могут происходить с высвобождением энергии потенциально доступной для внеземной формы жизни в физико-химических условиях другой планеты.

Наконец, необходимо иметь в виду возможную иную основу живых организмов и другой метаболизм в сильно отличных от земных условиях на другой планете (Ксанфомалити, 2019).

Возможно, что объединяющей в таком случае может быть как раз системная концепция живого, как некой ограниченной в пространстве структуры, включающей в себя различные взаимодействующие элементы, в нашем понимании – клеточной структуры. Даже если взаимодействующие элементы системы будут сильно отличаться друг от друга, то объединяющим критерием остается функциональная составляю-

щая живой системы и ее структурная составляющая.

Таким образом, жизнь с точки зрения системного подхода и при анализе земных биосистем можно определить как сложную, ограниченную в пространстве и способную поддерживать свою структуру систему с взаимосогласованно функционирующими элементами и играющую активную преобразующую роль в геохимических процессах планеты.

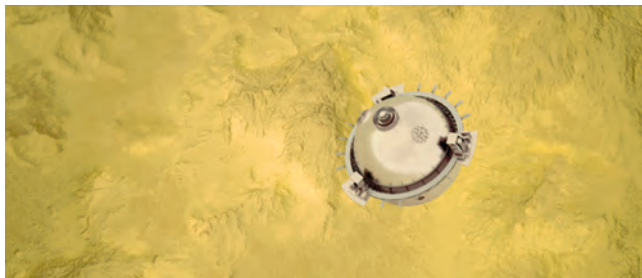
В целом, очевидная системность и высокая интегративность астробиологии, а также характер и глубина вопросов, которые она исследует, несомненно, указывают на ее связь с учением космизма как ее базового исторического мировоззрения.

Можно говорить о том, что из всех современных дисциплин астробиология наиболее явно сформировалась как научная методология познания окружающего мира в рамках учения космизма. Ее возникновению предшествовали концептуальные научные открытия, под влиянием которых учение космизма сначала обрело свое естественно-научное направление и далее при введении системного подхода к изучению явлений природы поспособствовало формированию астробиологии. Пожалуй, ни по одной другой научной дисциплине нельзя проследить столь осязаемо связь науки и философии.

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АСТРОБИОЛОГИИ

Астробиология относится к фундаментальным дисциплинам широкого спектра научных знаний, а ее исследовательские программы направлены на будущие открытия и должны, прежде всего, ориентироваться на государственные и государственно-частные источники финансирования.

Миссия NASA DAVINCI
(Deep Atmosphere Investigation
of Noble gases, Chemistry)
по изучению атмосферы
Венеры и возможной жизни в ее
облачном слое, планируется
к запуску в 2031 г.
Источник: NASA 67



Как и для многих естественных наук, основным методом для астробиологии является экспериментальный метод познания, получение и анализ фактического материала, что предполагает разработку новой методологии, поиск новых объектов исследования и организацию экспедиций и космических миссий.

Специфика предмета исследования астробиологии предполагает работу ученых в рамках различных научных программ смежных направлений, в которых астробиологические исследования планируются как их часть с последующей интеграцией данных, полученных в разных программах, в единую астробиологическую концепцию.

Такая тенденция развития астробиологии до некоторого времени преобладала, однако, за последние два десятилетия мировое сообщество астробиологов активно включилось в работу по объединению усилий и структуризации научно-исследовательской деятельности в рамках самостоятельного астробиологического направления с собственными научно-исследовательскими программами, финансированием и организационными мероприятиями.

Необходимо сказать, что на большие научные перспективы астробиологии и важность ее дальнейшего развития указывал еще в 1956 г. ее основоположник Г.А. Тихов, когда писал о необходимости создания астробиологического института: «Назрела необходимость создания специального астробиоло-

гического института, в котором были бы сосредоточены силы астрономов, физиков, химиков, ботаников, микробиологов, биологов широкого профиля и т. д. Институт должен располагать оборудованной по последнему слову техники астрономической обсерваторией и химической лабораторией, организовывать экспедиции в различные места земного шара. Не может быть сомнения в том, что перед новой наукой открыто широкое поле исследования».

Все эти идеи в настоящее время активно воплощаются в США и Европейском Союзе, где были созданы Институт астробиологии NASA (NASA Astrobiology Institute, NAI, 1998¹) и Европейский астробиологический институт (European Astrobiology Institute, EAI, 2019²), активно действуют Европейская астробиологическая ассоциация (European Astrobiology Network Association, EANA, 2001³).

Проводится организация исследований, происходит объединение рабочих групп астробиологов различного направления, разрабатываются научные и образовательные программы, включающие организацию экспедиций, семинаров и летних школ. Астробиологи активно включаются в создание научных проектов, которые конкурируют с проектами других научных направлений за получение финансирования.

¹ <https://astrobiology.nasa.gov/naei/>

² <https://europeanastrobiology.eu/>

³ <http://www.eana-net.eu/>

Важнейшим инструментом интеграции астробиологов являются регулярные встречи в рамках международных и национальных конференций и совещаний, на которых обсуждаются результаты проведенных исследований и перспективы развития.

Важным аспектом развития западной астробиологии является финансовая поддержка со стороны космических агентств – ESA в Европе и NASA в США.

Астробиологические институты представляют собой виртуальные организации, в состав которых входят лаборатории из различных университетов или научно-исследовательских институтов, в которых ведутся работы астробиологического направления и которые оказывают финансовую поддержку работе института.

Рабочие группы Европейского астробиологического института отражают приоритетные направления исследования западной астробиологии, которые включают изучение формирования и эволюции планетных систем и поиск обитаемых миров, пребиотический синтез, вопросы происхождения жизни и ее эволюции, изучение экосистем экзопланет и условия их возможной обитаемости, изучение земной жизни в экстремальных условиях, биосигнатуры и их поиск за пределами Земли, а также исторические, философские, социальные и этические проблемы астробиологии.

Важным событием для европейских астробиологов было начало работы первого совместного проекта в рамках программы «Происхождение и эволюция жизни на Земле и во Вселенной» в 2014 г., в котором участвовало почти 200 исследователей из 30 стран. Это позволило сформировать рабочие группы и начать организацию экспедиционных исследований, проведение семинаров. Начал работать интернет-сайт, необходимый для информационного

обеспечения специалистов и всех интересующихся проблемами астробиологии, там же размещались вакансии для студентов и молодых ученых для развития их карьеры в области астробиологии.

Был разработан дистанционный курс по астробиологии, где ведущие ученые из разных стран Европы читают лекции для студентов различных университетов. Наконец, успешным оказался проект организации летних школ, где молодые астробиологи могут повысить свою квалификацию. Успешными оказались и регулярные семинары в рамках организации AbGradE (Astrobiology Graduates in Europe), цель которой – вдохновлять, обучать и продвигать связи между начинающими учеными и студентами в области астробиологии, космической науки и других смежных областей.

В рамках образовательного пространства ряд университетов Европы ввел в свои учебные программы курсы по астробиологии, в которых каждый университет адаптировал такие лекции под свое приоритетное направление. Поскольку объем вопросов, который рассматривается в рамках астробиологии, очень большой, ее отдельные разделы биологического, химического, геологического и других направлений удалось органично вписать в программу преподавания университетов.

Наконец, в Германии активно действует Национальное астробиологическое общество (Deutsche Astrobiologische Gesellschaft, DAbG⁴), объединяющее различные организации, которое берет на себя как организацию национальных конференций по астробиологии, так и координацию научных исследований и поддержку студентов в рамках страны.

Основным критерием успеха деятельности западных астробиологов является признание астробиологии научным

⁴ <https://www.astrobiologie.de/>



Марсоход «Розалинд Франклин» Европейского космического агентства (ESA) будет изучать, в том числе, возможную прошлую и существующую жизнь на Марсе, запуск планируется в 2028 году. Источник: ESO/G. Hudepohl

сообществом в качестве актуального самостоятельного направления исследований, конкурентоспособного и перспективного, с возможностью финансирования наравне с другими приоритетными научными направлениями.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АСТРОБИОЛОГИИ

Во второй половине XX в. началась эра активного освоения околоземного космического пространства. Был запущен первый спутник с живым существом – собакой Лайкой (1957). Первый космонавт Ю.А. Гагарин побывал в космосе (1961). Были организованы космические миссии к планетам Солнечной системы, космические аппараты успешно приземлились на поверхность Луны («Луна-9», 1966), Венеры («Венера-7», 1970) и Марса («Марс-3», 1971).

Появилась возможность изучать воздействие космических факторов на земные организмы на орбите.

Большое значение для астробиологии имеют результаты российской программы «Бион» по запуску биоспутников на низкие околоземные орбиты. Эксперименты проводились с 1973 по 1996 г. и в 2013–2014 гг. для изучения влияния ионизирующего космического излучения и длительной невесомости на клеточный, тканевый и системный уровень организации животных, растений, микроорганизмов.

Всего было запущено 13 биоспутников с разными биологическими объектами на борту: обезьянами, крысами, мышами, дрозофилами, гекконами, черепахами, рыбами, дрожжами, бактериальными клетками, низшими и высшими растениями.

До конца 2024 г. планируется запуск еще одного биоспутника «Бион-М» № 2



«Бион-6» (Космос-1514) был запущен в 1983 году с приматами и крысами на борту

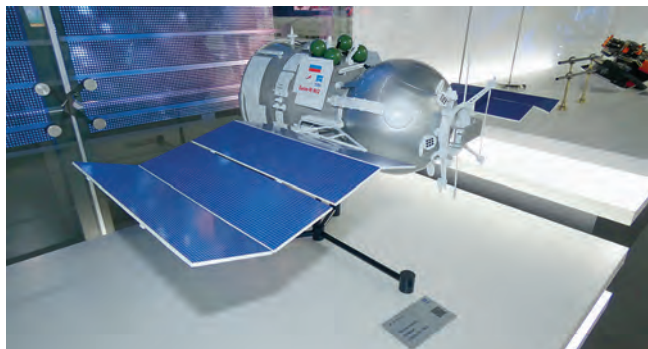
на орбиту новой высокоширотной станции РОС.

Регулярно проводятся биологические эксперименты на Международной космической станции. Причем за 25 лет работы станции большая часть всех исследований (30%) была посвящена космической биологии и физиологии (Орлов, 2024).

В числе наиболее значимых можно назвать следующие эксперименты (здесь мы рассматриваем только биологические):

- «Полиген» (2010 г.), в котором изучалось влияние космической радиации на генетический аппарат дрозофил.

Макет спутника «Бион-М» № 2



- «Статокония» (2005–2008 гг.) о влиянии невесомости на орган равновесия – (статоцист) двух видов наземных улиток, что позволило изучить работу вестибулярного аппарата в условиях отсутствия гравитации.

- «Регенерация» (2014–2019 гг.) о влиянии условий невесомости при определенном радиационном и вибрационном фоне на регенерацию глаза улиток, а также изучение регенерации отдельных фрагментов тела планарий.

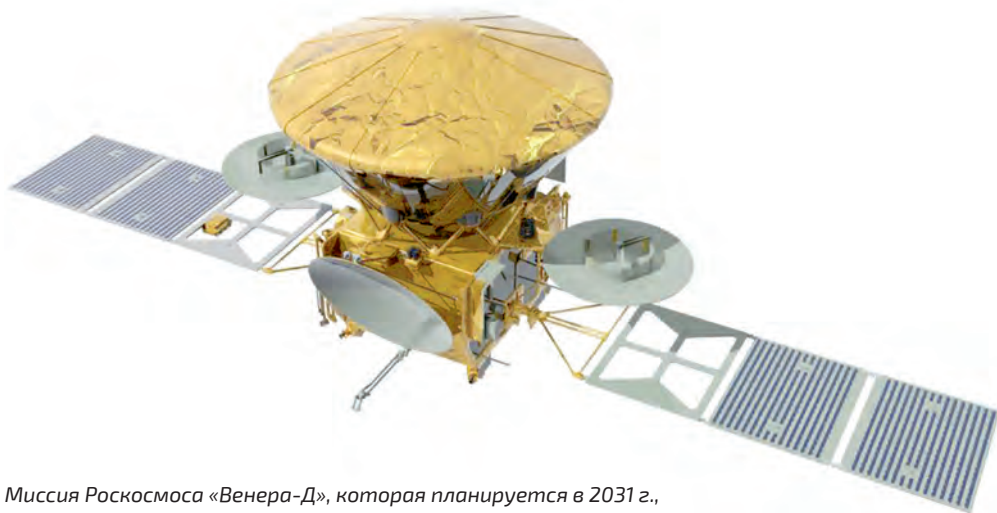
- «Аквариум» (2014 г.) – эксперимент по исследованию активации личинок африканского комара в невесомости.

- «Растения» (1999–2022 гг.) эксперимент, в результате которого было показано, что за четыре полных цикла развития в условиях космического полета никаких изменений генетического аппарата растений не происходит.

- «Биориск» (2022 г.) о влиянии радиации за бортом станции на семена растений, покоящиеся яйца низших ракообразных, личинки комара, штаммы микроорганизмов в разных типах почв.

- «Инкубатор» (2016, 2023 гг.) о влиянии космического полета на эмбриональное развитие птиц – японских перепелов.

В настоящее время Россия как космическая держава уделяет большое внимание организации различных космических программ и миссий, как околоземных, так и при исследовании планет Солнечной системы, в рамках которых



*Миссия Роскосмоса «Венера-Д», которая планируется в 2031 г., будет направлена, в том числе, и на поиск прошлой и существующей жизни в облачном слое Венеры и, возможно, на поверхности планеты.
Изображение: АО «НПО Лавочкина»*

планируются астробиологические исследования. Ведутся активные разработки в отношении исследования Марса и Венеры, где одной из задач является поиск на этих планетах жизни или ее следов существования в прошлом (Ильин, 2023; Сычев, 2023).

Одно из направлений астробиологических исследований в России – изучение экосистем с экстремальными условиями, в качестве аналогов экосистем других планет. В таких местообитаниях можно проводить исследования по изучению адаптивных механизмов выживания и развития микроорганизмов в условиях экстремальных факторов окружающей среды. Там также могут проводиться исследования по поиску новых экстремофильных организмов с уникальными характеристиками.

Подобные исследования по изучению возможности адаптации жизни к экстремальным условиям можно проводить в разных районах Арктики и Антарктики (Bulat, 2018). Кроме этих регионов, в качестве экстремальных экосистем, имеющих значение для астробиологи-

ческих исследований, можно рассматривать термальные источники, расположенные на Камчатке (Kompanichenko, 2019), и алкалофильные озера Бурятии. Интересным объектом для таких экспериментов могут быть антропогенные экосистемы – рудные «завалы» и радиоактивные открытые хранилища.

Важнейшим научным направлением астробиологии является бактериальная палеонтология, которую основали российские ученые академики РАН А.Ю. Розанов и Г.А. Заварзин (Розанов и Заварзин, 1997). Это направление изучает ископаемые микроорганизмы, закономерности их сохранения в земных породах и интерпретирует с их помощью геобиологические события на Земле.

В целом, следуя историческим традициям научно-философской мысли в России, астробиологические концепции российских ученых часто характеризуются своей направленностью на глобальность проблематики, подчинение частного общему и поиск взаимосвязей.



Структура основных астробиологических направлений в России

Важным условием для устойчивого развития любого научного направления в современном мире является взаимосвязь научно-исследовательской деятельности, образования и практического применения, которое может происходить, например, при разработке инновационных идей, приносящих прибыль. Эта взаимосвязь рассматривается в известной концепции треугольника знаний (Unger and Polt, 2017), причем, чем прочнее взаимодействия в рамках такого треугольника, тем устойчивее направление.

Применительно к астробиологии важнейшим компонентом для ее развития является сфера образования.

В настоящий момент уже существуют условия для внедрения курсов астробиологии в учебные программы университетов для подготовки специалистов на уровне магистров, потребность в которых постепенно, но неуклонно растет.

Более сложным аспектом являются инновационные разработки, которые могли бы дать возможность астробиологам получать существенную финансовую независимость, поскольку основной предмет изучения астробиологии предполагает государственную поддержку. Тем не менее и в этом направлении существует возможность сочетания фундаментального и практического

характера деятельности. Приборная база астробиологов и, прежде всего, инновационные разработки для изучения и детекции биологических объектов вне Земли, могут быть успешно применимы и для земных экосистем, например, в таких направлениях, как экология или медицина.

Наконец, чрезвычайно важным в современный период является использование электронных ресурсов с целью эффективного обмена научной информацией, сообщениями о рабочих вакансиях в области астробиологических исследований, организации совместных проектов, проведения онлайн-конференций и оперативного решения вопросов, а также для участия в различных международных сообществах и ассоциациях по астробиологии.

Важным аспектом сотрудничества ученых-астробиологов является их регулярное взаимодействие в рамках встреч и конференций как национальных, так и международных, обмен научными идеями и организация совместных экспедиций.

В России организация астробиологических семинаров и конференций осуществляется в основном силами трех организаций: Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН в Пушкино (ИФХиБПП РАН), Института космических исследований РАН в Москве (ИКИ РАН) и Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне. Одновременно в различных государственных учреждениях существуют группы исследователей, которые занимаются астробиологическими или смежными с ней направлениями достаточно обособленно.

Важным аспектом развития астробиологии в России, как, собственно, и во всем мире, является привлечение к сотрудничеству специалистов, которые занимаются проблематикой,

имеющей отношение к астробиологическому направлению, но по различным причинам не считают возможным представлять результаты этих исследований в рамках астробиологии. Их приглашение участвовать в работе астробиологических конференций и совместных научных проектах является чрезвычайно важным и перспективным для преумножения научного потенциала в области астробиологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Российская астробиология как наука зарождалась в середине прошлого столетия на основе накопившегося к тому времени научного знания о космосе и под влиянием научно-философской мысли основоположников русского космизма, которые оставили после себя широкое интеллектуальное поле как основу для дальнейших исследований явлений жизни, как космического феномена во всем многообразии ее проявлений.

Достижения российских ученых и бурное развитие космической техники в СССР способствовали постепенному развитию астробиологических исследований и их дифференциации на различные поднаправления. В настоящий момент российская астробиология идет по пути взаимодействия научно-исследовательских групп, однако сильно нуждается в государственной финансовой поддержке для ее дальнейшего развития.

Особенность астробиологии, связанная с необходимостью интеграции различных наук и поиска научной истины при их взаимодействии, имеет важную мировоззренческую составляющую, на которую указывал академик Тихов: «Тесная связь астробиологии с астрономией, физикой, химией, биологией

объединит усилия исследователей. Все это даст науке единый комплекс знаний о жизни на Земле и других планетах. А в будущем... перед астробиологией откроются поистине неограниченные возможности. Человечеству будут доступны тайны жизни на других планетах. Изучение жизни на Земле и на других планетах сольется воедино» (Тихов, 1953).

В современном мире и особенно в научных воззрениях развитых стран, созвучной всему вышесказанному об астробиологии как о дисциплине, в рамках которой происходит интеграция различных естественно-научных направлений, является набирающая силу идея коэволюции – совместного развития человека и природы (космоса).

Важными становятся идеи партнерства, а не собственничества по отношению к природе, проблемы глобальной экологии, что абсолютно соотносится с основными положениями космизма и предполагает создание научных концепций и мировоззренческих представлений, направленных на преодоление инерционных антропоцентристских взглядов на мир.

Россия с ее огромным научным потенциалом, в частности в области космических исследований, и большим философским и культурно-историческим наследием в области познания мира может занять одну из ведущих ролей в мировой астробиологии.

Создание в будущем российского астробиологического института было бы прекрасной возможностью структурировать научные исследования российских астробиологов и открыть новые перспективы для сотрудничества с астробиологами во всем мире.

Нахождение общего языка между учеными различных направлений, зачастую имеющих разный тип науч-

ного мышления и использующих разные методические подходы к получению результата, является мощным инструментом плодотворной кооперации между учеными и всеми людьми, которым интересна эта область знания.

С этой точки зрения можно говорить, что астробиология – наука, которая безусловно лидирует в отношении перспективных, прорывных и одновременно интеграционных процессов в современном мировом научном сообществе и имеет определенное позитивное влияние на мировоззрение человечества в целом.

Литература

1. Зеленый Л.М. У истоков исследования планетных атмосфер и философии русского космизма // Земля и Вселенная. 2022. № 3.
2. Маров М.Я. Астрономические и космохимические аспекты проблемы происхождения жизни // Астрономический журнал. 2023. Т. 100, № 8.
3. Петрова Е.Н. Космизм в российском искусстве первой половины XX века // Земля и Вселенная. 2023. № 1.
4. Kotsyurbenko Oleg R., Kompanichenko Vladimir N., Brouckov Anatoli V., Khrunyk Yuliya Y., Karlov Sergey P., Sorokin Vladimir V., Skladnev Dmitry A. Different Scenarios for the Origin and the Subsequent Succession of a Hypothetical Microbial Community in the Cloud Layer of Venus // Astrobiology. 2024. V. 24. № 4.
5. Seager S., Bains W., Petkowski J.J. Toward a list of molecules as potential biosignature gases for the search for life on exoplanets and applications to terrestrial biochemistry // Astrobiology. 2016. V. 16. № 6.
6. Taubner R.-S., Pappenreiter P., Zwicker J. et al. 2018. Biological methane production under putative Enceladus-like conditions // Nature Com. V. 9.
7. Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. Бактериальная палеонтология // Вестник РАН. 1997. № 3. С. 241–245.

МОНИТОРИНГ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА



ИПАТОВ Александр Васильевич,

доктор технических наук

Институт прикладной астрономии РАН

ВЕДЕШИН Леонид Александрович,

доктор технических наук

Институт космических исследований РАН

ГЕРАСЮТИН Сергей Александрович



DOI: 10.7868/50044394824030058

СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В настоящее время функционирующие КО уклоняются от КМ по команде с Земли. У МКС есть условный защитный периметр: $1.5 \times 50 \times 50$ км. Если траектория объекта проходит через него, то МКС выполняет маневр уклонения. При высокой вероятности столкновения экипаж станции переводится в возвращаемый корабль, чтобы в случае аварии

экстренно эвакуироваться. К примеру, только в 2008 г. было зафиксировано 246 опасных сближений МКС с элементами КМ, в том числе 41 крайне опасных. Всего за 25 лет эксплуатации МКС 33 раза удалось за счет маневров избежать встречи с КМ. Свой первый маневр ухода от столкновения с КМ станция совершила 26 октября 1999 г. Напомним, что 3 декабря 2021 г. был осуществлен уже 30-й маневр уклонения, 16 июня 2022 г. – 31-й, а 24 октября 2022 г. –

Окончание. Начало статьи см. в *ЗиВ*, 2024, № 2.



Компьютерная модель засорения околоземного космического пространства проекта NASA Stuffin Space. Красными точками обозначены действующие или не работающие космические аппараты, желтыми – последние ступени или разгонные блоки ракет-носителей, серыми – остальные обломки космического мусора. NASA

32-й¹. Последний раз это произошло 10 ноября 2023 г. Двигатели грузового корабля «Прогресс МС-24» проработали 316.5 секунд и выдали импульс величиной 0.5 м/с, в результате высота орбиты МКС увеличена на 900 м и стала 419×436 км, благодаря чему удалось избежать аварии. Из-за повышения вероятности столкновения с КМ в последние десятилетия заставило специалистов при разработке модулей МКС устанавливать противометеоритную защиту на наиболее уязвимых участках, чего не требовалось на предыдущих станциях. К примеру, летящая со скоростью более 2 км/с частица диаметром 0.5 мм может повредить иллюминатор МКС или пробить скафандр космонавта, работающего в ОКП вне корабля, даже если этот скафандр изготовлен из многослойного материала. Но от нее можно защититься

с помощью специального экрана многослойной конструкции, состоящего из алюминия, керамики и полиамидных волокон. Предусматривается также уменьшение количества деталей, отделяющихся от ракет-носителей в процессе выведения полезных нагрузок на орбиты, а также практически полное исключение орбитальных взрывов, как мощнейших источников КМ. Для предотвращения непреднамеренных разрушений на разгонных блоках предусмотрена операция по стравливанию давления из системы наддува баков, а после окончания сроков активного существования для предотвращения разрушения батарей электропитания предусматривается их ускоренная разрядка и отключение. Реализуется комплекс мер по переводу отработавших свой срок КО на более безопасные орбиты захоронения или по удалению их из ОКП путем ввода в плотные слои атмосферы.

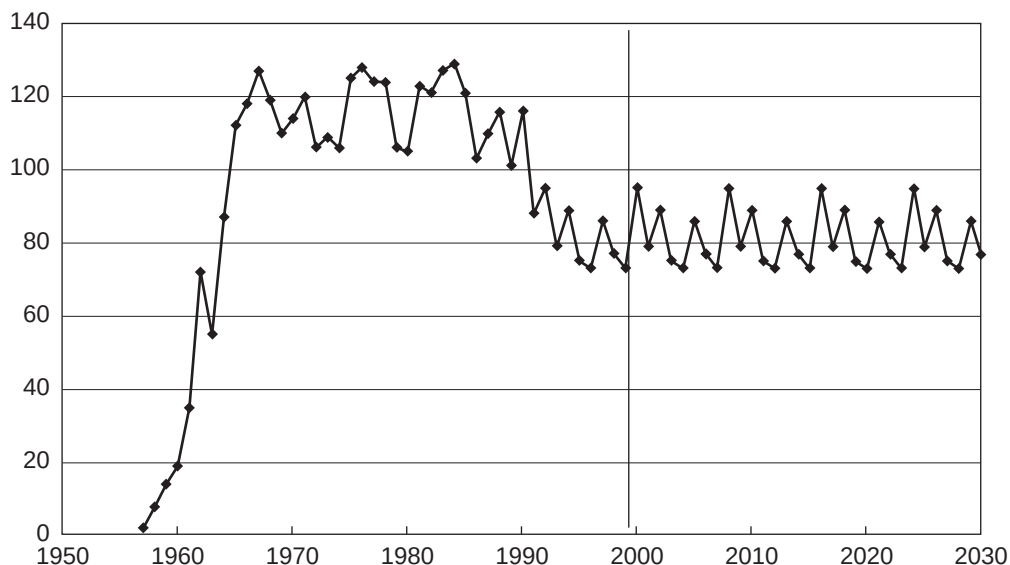
¹ Вениаминов С.С. Космический мусор. М.: ИКИ РАН, 2023. С. 120–122.

Неконтролируемый рост КМ вызывает серьезную озабоченность за будущую безопасность ОС и ПКК. Растущее засорение космоса может значительно ограничить возможности космической деятельности и даже вообще затруднить доступ человека в космос. Возникает эффект Кesslera – непригодность ближнего космоса для практического использования в результате засорения околоземной орбиты. С 1957 г. на орбите осталось огромное количество КО: неработающие спутники, ступени ракет, разгонные блоки, обломки взорвавшихся КА и их фрагменты, образовавшиеся в результате столкновения спутников. Рано или поздно засорение КМ околоземной орбиты приведет к тому, что станут невозможными полеты КА. Особое значение приобретает скопление КМ в зоне ГСО в силу ограниченности ее размеров для спутниковой связи, навигации, метеорологии, ДЗЗ и др. Исследуется целесообразность применения на практике требования по уводу разгонных блоков низкоорбитальных запусков на орбиту со сроком баллистического существования менее 25 лет. Чтобы оценить масштабность проблемы NASA создали компьютерную модель распространения рукотворных объектов на орбите Земли. На ней 95% белыми точками обозначены места расположения КМ. Орбита нашей планеты напоминает гигантскую свалку из отходов от космической деятельности. Разработчики проекта NASA Stuffin Space также решили создать свою модель околоземной орбиты с КМ.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

В 1981 г. NASA принимает 10-летнюю программу по изучению засоренности ОКП. После чего проблема КМ приобретает значение комплексной задачи с системным подходом к ее реше-

нию. В 1989 г. была образована советско-американская рабочая группа по этой проблеме, в 1990 г. проблема КМ нашла отражение в резолюции Генеральной Ассамблеи ООН. Официальный статус на международном уровне она получила после доклада Генерального секретаря ООН под названием «Воздействие космической деятельности на окружающую среду» 10 декабря 1993 г., где особо отмечено, что проблема имеет международный, глобальный характер. В своем выступлении он отметил: «Нельзя говорить, что засоряется околоземное пространство какой-то отдельной страны, засоряется космическое пространство всей планеты, что отрицательно влияет на все государства в равной степени». В результате был образован Координационный комитет (Inter Agency Space Debris Coordination Committee, IADC). В рамках научно-технического подкомитета Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях с участием российских и иностранных представителей был утвержден многолетний план работы по проблемам КМ, рассматриваются вопросы международно-правового регулирования, проводятся консультации специалистов по разработке математических моделей засорения ОКП и количественной оценки КМ, а также рекомендации по обеспечению безопасности полетов пилотируемых кораблей и орбитальных станций. В рамках IADC ведутся работы по информационному обмену данными слежения российских и зарубежных средств за КМ. В июне 2007 г. на заседании Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях были приняты Руководящие принципы предупреждения образования КМ, разработанные IADS. В 2018 г. ООН выступила с инициативой сотрудничества в рамках программы «Открытая Вселенная» по установке телескопов в развивающихся странах, организация и обучение наблю-



Модель ORDEM-2000 запусков космических аппаратов в космос. Кривая показывает количество запущенных КА по годам до черты 2000 г., когда была создана модель, справа – вероятные запуски до 2030 г., которые не совпали с фактическими, их было значительно больше: в 2010 г. запущен 131 КА, в 2020 г. – 186 КА. NASA

дателей, создание совместной базы данных по регистрации КО и КМ. Организация международного сотрудничества в создании достаточного количества географически разнесенных наблюдательных средств обеспечения высокоточных координатных измерений по каждому наблюдаемому КО и КМ позволит обнаруживать крупные фрагменты КО и КМ в ОКП. Но пока не существует международной организации, которая бы могла обеспечить соблюдение какой-либо нормативно-правовой базы по КМ. Учитывая нынешнюю геополитическую обстановку, создание такой организации маловероятно. Для сколько-нибудь значимого результата государствам прежде самим необходимо выработать нормативно-правовую базу по проблеме КМ. Ответственность за орбитальные космические объекты лежит на государствах, которые их запускали. Одним из способов внедрить какой-то контроль в этой области могли бы послужить финансовые механиз-

мы, такие как страхование и материальная ответственность.

В NASA, РАН и ESA разработали ряд математических моделей распределения объектов КМ в ОКП, таких как ORDEM-2000, SPDA и др. Данные модели позволяют рассчитать концентрацию частиц КМ для заданной высоты полета КО на любой момент времени. Учитывая важность этой проблемы, в рамках Совета РАН по космосу создана Экспертная группа из ученых и специалистов по подготовке предложений о создании российской системы противодействия космическим угрозам. Совет РАН по космосу на своих заседаниях 11 мая и 27 июня 2019 г. заслушал доклады ученых и специалистов по фундаментальным и прикладным аспектам проблемы КМ и принял решение включить в Программу фундаментальных научных исследований РАН задания по разработке эффективных методов изучения проблемы КМ. В ИКИ РАН в 2019 г. состоялась

Всероссийская конференция «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты, угрозы». В рамках подготовки проекта Федеральной целевой программы «Исследования научно-технических проблем и разработка предложений по созданию перспективных средств измерений, наблюдения и контроля, единой системы предупреждения и парирования космических угроз» РАН предложила проект создания на территории России и за рубежом новых оптических средств мониторинга ОКП. В целях решения проблемы КМ и предотвращения астероидно-кометных угроз, на основе отечественного и зарубежного опыта экспертами рассматриваются предложения по созданию службы мониторинга и управления экологическим состоянием ОКП.

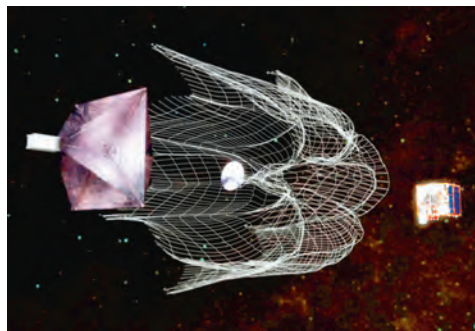
1 января 2019 г. в России вступил в силу законопроект о борьбе с КМ. Документом устанавливаются требования о том, что вся запускаемая техника должна быть сконструирована таким образом, чтобы исключить образования КМ при штатной работе (выброс пружин, толкателей, фрагментов и др.). Также выдвигаются требования по предотвращению аварий – взрывов топлива (слив топлива после завершения работы КО, разрядка его аккумуляторов, стравливание газов и др.) или столкновений с другой космической техникой (выбор подходящих дат запуска, высот и траекторий орбит полета). Закон требует, чтобы каждое появление КМ тщательно анализировалось, чтобы не допустить повторения подобной ситуации. Также вводится запрет на применение средств самоликвидации на ВСО в разрабатываемых в России КО, но разрешается их применение перед входом в атмосферу для предотвращения падения на Землю крупных обломков. Еще вводится ограничение на время нахождения КМ на ОКП: на высоте 600–800 км они будут находиться до 25 лет, после чего они либо сами должны сгореть

в атмосфере Земли, либо их отправят в другие места сбора КМ. В Федеральной космической программе России на 2016–2025 гг. включены работы по созданию КО для уборки мусора с ГСО, на которых находится большое количество неэксплуатируемых КО.

В США работает специальная служба, которая следит за КМ. Она отслеживает его передвижение и предупреждает о сближении с КО и ракетами, которая считает, что вопрос КМ в космосе – это часть их политики. Они утверждают, что освоение ОКП – одно из самых важных действий, которое должно совершать человечество, поэтому постоянно разрабатывают новые законы, чтобы избавить ОКП от КМ. Они подготовили документ Space Policy Directive-3, в котором описали необходимость модернизировать текущую систему мониторинга КМ, а также разработать методы борьбы с ним. Эта работа была поручена Министерству обороны США с участием других министерств и ведомств. Дальнейшее неконтролируемое засорение космоса, по прогнозам экспертов ООН, к 2050 г. может привести к ограничению использования или временному прекращению запусков КО.

НЕОБХОДИМОСТЬ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧИСЛА ЗАПУСКОВ

В настоящее время продолжается бум запусков КО. Сразу несколько компаний собираются покрыть планету доступным спутниковым интернетом. Это направление приобретает еще большее значение вследствие наметившейся тенденцией по использованию в ОКП CubeSat массой менее 100 кг (см. выше). Но главная проблема увеличения КМ в ОКП заключается в том, что она способна закрыть для человечества дальнейшие безопасные полеты в космос. Это значит, что придется отказаться от использования КО для связи,



Английский КА RemoveDEBRIS после вывода с МКС на орбиту 20 июня 2018 г. (справа), который выполнил эксперимент по сбору космического мусора с помощью сети (слева). NASA, <https://scientificrussia.ru/>

телевидения, навигации, дистанционного зондирования Земли, прогнозов погоды и др. Возникает необходимость регулирования количества запусков КО на международном уровне или введения квот на запуски, как это имеет практику для геостационарных КО.

В 2017 г. состоялась традиционная ежегодная Европейская конференция по проблемам КМ, на которой более 300 ученых из многих стран пытались определить действенные методы борьбы с загрязнением ОКП и пришли к выводу, что универсальных методов борьбы с КМ достаточной эффективности на практике пока не существует. Но ввиду высокой актуальности данной проблемы мировое сообщество наметило ряд приоритетных направлений ее решения: 1) всестороннее наблюдение за ОКП, особенно за ГСО, а также планомерная каталогизация существующих обломков КМ; 2) использование математических моделей для составления прогнозов появления новых обломков, возможных угроз для предстоящих полетов и неожиданного сближения обломков КМ с возможным столкновением, а также их неуправляемого падения на Землю; 3) разработка методов, позволяющих обезопасить работающие КО; 4) создание и скорейшее применение методик, способных уменьшить засоренность ОКП.

На данный момент предлагается множество способов очистки ОКП от КМ, но ни один из них не является приемлемым в плане экономической целесообразности.

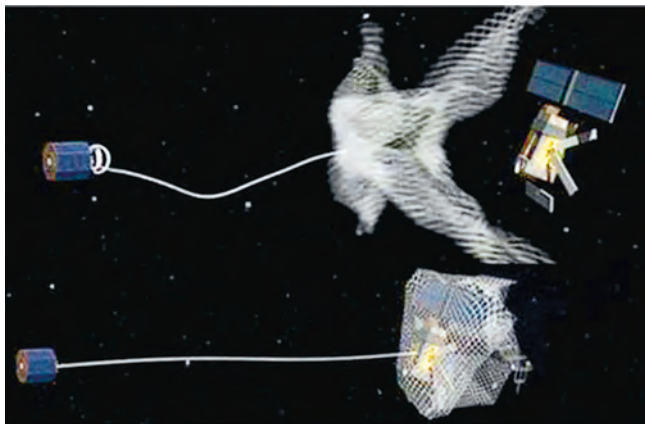
ПУТИ СОКРАЩЕНИЯ КМ В ОКП

Задача поисков путей реального снижения засоренности ОКП пока не получила определенного решения. Возможные методы снижения и прекращения роста будущей популяции КМ делятся на две категории: снижающие краткосрочную опасность засорения ОКП и уменьшающую эту опасность в перспективе. Методы активного удаления КМ с орбит возникли почти 40 лет назад, однако из-за большой технической сложности и чрезвычайно высокой стоимости подобных проектов их пока реализовать невозможно.

Российскими и иностранными специалистами рассматривается комплекс мер по уводу крупных КО после их функционирования на орбиты захоронения, расположенные на 50–1000 км выше ГСО, с помощью различных средств сборщиков КМ в виде буксира, надувных шаров, аппаратов с солнечным парусом, спутников-«липучек», лазерных пучков, потока плазмы, электро-

динамических «ловушек» и др. Например, 2 апреля 2018 г. космический грузовик Dragon CRS-14 американской компании SpaceX помимо 2.6 т грузов, предназначенных для МКС, доставил на орбиту прототип разработанного британскими инженерами уборщика КМ, аппарат массой 100 кг получил название RemoveDEBRIS (убрать мусор), он снабжен сетью и гарпуном, в качестве мишеней ему служили несколько CubeSat размером 30 см. 16 сентября 2018 г. КА захватил сетью CubeSat, 8 февраля 2019 г. гарпуном, выпущенным со скоростью 20 м/с, был пробит один из CubeSat и взят на КА с помощью выдвинутой стрелы длиной 1.5 м. Эксперимент оказался удачным, вероятно, в будущих миссиях начнется очистка от КМ². Японские и австралийские специалисты придумали способ сведения КМ с орбиты с помощью направленного на него потока плазмы, выпущенного из КА с ионного двигателя с двумя противоположно направленными соплами³. В нашей стране примерно к 2025 г. планируется создание ряда специальных устройств для уборки неиспользуемых КО, расположенных на ГСО.

ESA рассматривает следующие сценарии: захват обломков КМ с помощью сети и дальнейшая их транспортировка на утилизацию или на орбиту захоронения; прикрепление реактивного двигателя к КА, осуществляю-



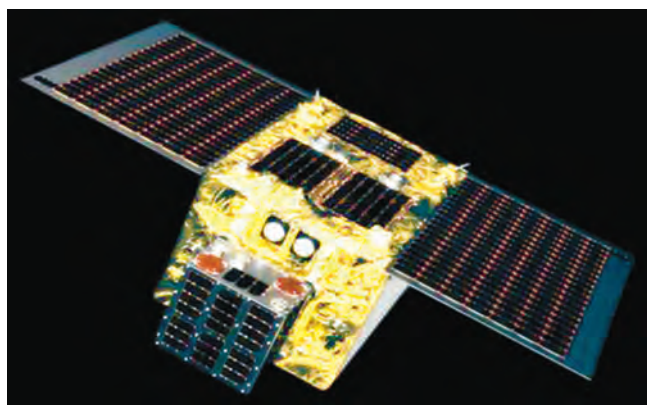
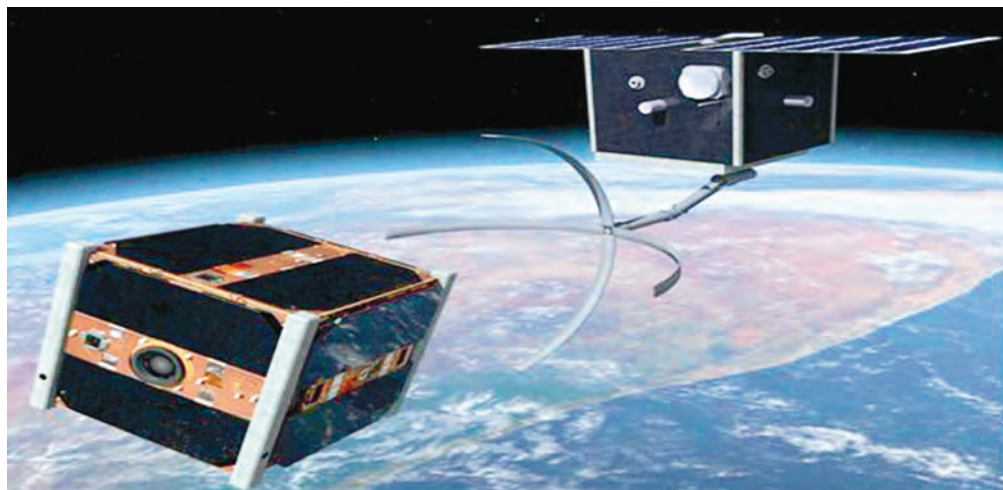
Проект ESA по захвату обломков космического мусора с помощью сети и дальнейшая их транспортировка на утилизацию или на орбиту захоронения. ESA

щего транспортировку; использование солнечного паруса для транспортировки КО; выведение КМ с орбиты с помощью обстрела реактивной струей. В настоящее время ученые и специалисты разрабатывают различные проекты борьбы с КМ.

Компания SpaceX уже отправила на МКС робота-уборщика обломков КМ с использованием воздушных шаров по проекту GOLD System. Большой и тонкий воздушный шар должен обернуть фрагменты мусора, увеличивая их аэродинамическое сопротивление. Исследовательский центр Surrey Space Centre работает над космической системой уборки мусора с помощью буксира с солнечным парусом. КА HybridSail с помощью троса будет цеплять фрагменты, разворачивать парус и уводить их с орбиты. Идею создания вольфрамового венника на орбите разработал ученый Гурудас Гангули из США. Он предложил распылить на высоте 1.1 тыс. км облако из частиц вольфрама. По его расчетам, такой тяжелый и плотный металл будет медленно опускаться к Земле, попутно тормозя мелкие фрагменты мусора. Гангули полагает, что пыль не будет вредить работающим КО. Для реализации проекта потребуется 20–25 лет.

² Первый космический субботник спутника RemoveDEBRIS // Научная Россия, 17 сентября 2018 г.: <https://scientificrussia.ru/articles/pervyj-kosmicheskij-subbotnik-sputnika-removedebris>; <https://en.wikipedia.org/wiki/RemoveDEBRIS>

³ Найден способ уборки космического мусора // Земля и Вселенная. 2018. № 6. С. 26.



Японские инженеры предложили вариант снятия с ОКП с помощью космического уборщика мусора (вверху), а специалисты из университета Тулузы разработали специальные буксиры, которые притягивают к себе космический мусор с помощью магнитного поля, который сгорает в атмосфере вместе с КМ (внизу)

Для уборки КМ предлагается также использовать реактивные буксиры, выталкивающие опасный КМ в атмосферу. Есть несколько проектов по переработке КМ прямо на орбите, так как КО содержат много редких и драгоценных металлов. Японские инженеры создали специальный радар, который распознает любые частички мусора, даже самые маленькие, они рекомендовали убирать мусор с помощью КА и спускать в атмосферу, где он сгорит. Китайские ученые предлагают не церемониться с КМ – они хотят создать лазер, с помощью которого можно уничтожать КМ. Специалисты из университета Тулузы разработали

специальные буксиры, которые притягивают к себе КМ с помощью магнитного поля якоря КА. Сингапурский стартап Astroscale, основанный японскими инженерами, предложил свой вариант уборки КМ с ОКП. Они создали космического уборщика мусора. Он определяет местонахождение КМ, сближается с ними, притягивает к себе и собирает. После того как КМ наполнит его до конца, он войдет в атмосферу Земли, сгорит сам и заодно поможет уничтожиться мусору. В 2016 г. доктор Зигфрид Янсон начал разрабатывать специальное устройство Brane Craft, с помощью которого можно очистить ОКП. Оно представляет собой

мембрану размером 90 × 90 см и весом 85 г. Принцип работы данного устройства очень простой – с помощью двигателей он подлетает к КМ, оборачивает его со всех сторон, создавая своеобразный кулечек, а затем направляет его в атмосферу Земли, где он сгорает. Конечно, еще не все доведено до идеала, но ученые уверены, что совсем скоро они смогут избавить ОКП от КМ. Они постоянно придумывают новые способы для борьбы с этой глобальной проблемой, но пока ни одно из предложений не избавило ОКП от проблемы КМ.

В настоящее время крупные части КО затапливают в несудоходных районах Мирового океана. Для ГСО, по инициативе Международного агентского координационного комитета (IADS), согласован «коридор», из которого должны вводиться отработавшие КО и доставившие их на орбиту разгонные блоки. Исследуется также целесообразность применения на практике требования по уводу ступеней ракет и разгонных блоков на орбиты со сроком существования менее 25 лет. Еще одной проблемой в ОКП является неконтролируемый сход с орбиты и падение на Землю крупных обломков КО и их несгоревших фрагментов, которые могут угрожать населенным пунктам и промышленным объектам. Дальнейшее неконтролируемое засорение космоса, по прогнозам экспертов ООН, к 2050 г. может привести к временному прекращению запусков КО. При сохранении современных темпов космической деятельности и используемых технологий по прогнозам ученых ожидается удвоение орбитального мусора к концу XXI в., что вплотную приблизит содержание мусора к уровню лавинообразного его размножения из-за взаимных столкновений в соответствии с синдромом Кесслера. Требования по удалению мусора в ОКП означают необходимость существенной перестройки всей космической деятельности. Необ-

ходимо исключить взрывы в ОКП, существенно сократить число запусков, увеличить срок службы КО, создание безотходных технологий их выведения на орбиты⁴.

Пока Россия и США разрабатывают различные документы и законы, Евросоюз уже приступил к решению проблемы ликвидации КМ и предложил использовать магнитные буксиры, чтобы очистить ОКП, их ориентация осуществляется по магнитному полю Земли. Это изобретение позволит менять траекторию движения КМ, собирать его в определенном месте ОКП, а затем сводить его с орбиты. Сборщик КМ, согласно планам, содержит охлажденные до сверхнизких температур сверхпроводящие электромагниты. Существующие и перспективные пути решения проблемы КМ: снижение массы запусковых КО, усиление его защиты, увеличение срока эксплуатации, обязательная утилизация КО и повышение маневренности. Эти решения помогут замедлить дальнейшее загрязнение ОКП.

По прогнозам, каждые полгода около 10 КО будут перемещаться на орбиту захоронения. Для МКС в 2017 г. создан ионный двигатель, который будет работать на КМ из космоса. Но чтобы его использовать, нужно для начала научиться отлавливать КМ. Ведь почти все КО – это части старых спутников и ракет, а значит, сделаны из дорогих материалов, которые можно использовать повторно. Роскосмос считает, что пока не существует достойных уборщиков КМ, нужно обезопасить Землю как можно лучше.

Фундаментальное решение проблемы засоренности ОКП требует уменьшения общей массы КО на орбитах. Долгосрочное прогнозирование про-

⁴ Романов В.И. Мусор преграждает путь в космос. 2014: <https://litresp.ru/skachat/ru/P/romanov-vadim-ivanovich/musor-pregrazhdaet-putj-v-kosmos>

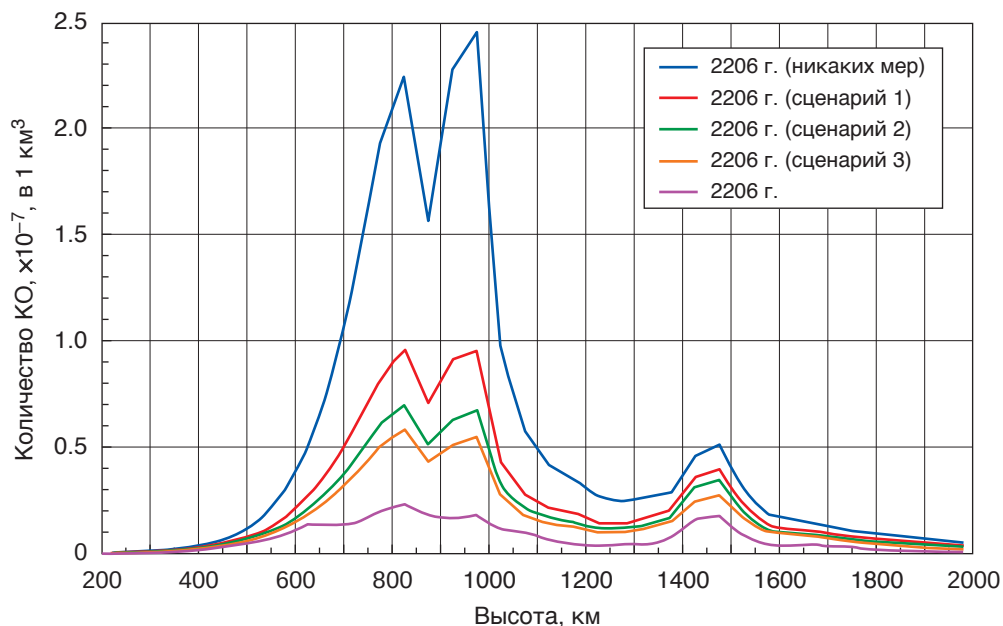


Диаграмма прогноза до 2206 г. распределения пространственной плотности крупных КО для различных сценариев борьбы с засорением ОКП. Пик приходится на орбиты высотой 750–1100 км. *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 4

цесса техногенного засорения космоса показывает, что даже при самых решительных мерах, таких как радикальная – немедленное прекращение всяких запусков и деятельности в космосе, все равно не решит проблему, так как ОКП очистится от КМ только через много лет. Однако, технический прогресс остановить невозможно. Прогнозы отмечают, что даже при самой жесткой борьбе с засорением космоса остановить этот процесс уже невозможно. Все известные реальные меры борьбы с КМ, кроме принудительного снятия КО с орбиты, пока могут только замедлить темп засорения ОКП, но не снизить общую массу КМ. Единственный реальный механизм увода КМ из космоса – это естественный или принудительный сход с орбит. Предлагаемые радикальные меры удаления крупного КМ из ОКП крайне неэкономичны при довольно низкой эффективности,

а реальных способов удаления мелкого КМ вообще нет. Для прекращения экспоненциального роста популяции КМ необходимо, кроме предотвращения взрывов на орбитах, активное снятие с орбит крупных КО и/или сокращение времени их орбитального существования⁵.

Человечество еще не скоро сможет систематически и безопасно избавляться даже от небольшого количества КМ. Поэтому необходимо продолжить комплексные исследования по системному анализу процессов засорения ОКП и распределения частиц вокруг Земли, математическому моделированию их движения, а также по разработке защитных мер с использованием самых современных технологий.

⁵ Liou J.-C., Johnson N. A Preliminary Active Debris Removal Study // *Orbital Debris Quarterly News*. 2007. V. 11. Iss. 4.

«ВТОРОЙ ТЕЛЕСКОП АМЕРИКИ»

СОЛОМОНОВ Юрий Владимирович

Московское общество любителей астрономии

ГЕРАСЮТИН Сергей Александрович

DOI: 10.7868/5004439482403006X

Читатели старшего поколения хорошо помнят, что в середине XX в. крупнейшим телескопом США был 5-метровый рефлектор обсерватории Маунт-Паломар. Тогда как о других телескопах США писали мало, не говоря уже о концепции Хирама Перкинса, в которой он определил термин «Второй телескоп Америки», в советской и российской литературе по астрономии не писали. В статье рассказывается, как шло соревнование в создании все больших телескопов-рефлекторов в XX в.

В 1908 г., благодаря знаменитому американскому астрофизику и оптику Джорджу Эллери Хейлу (1868–1938)¹, недалеко от Лос-Анжелеса (штат Калифорния) на горе Вилсон высотой 1742 м были построены крупнейшие

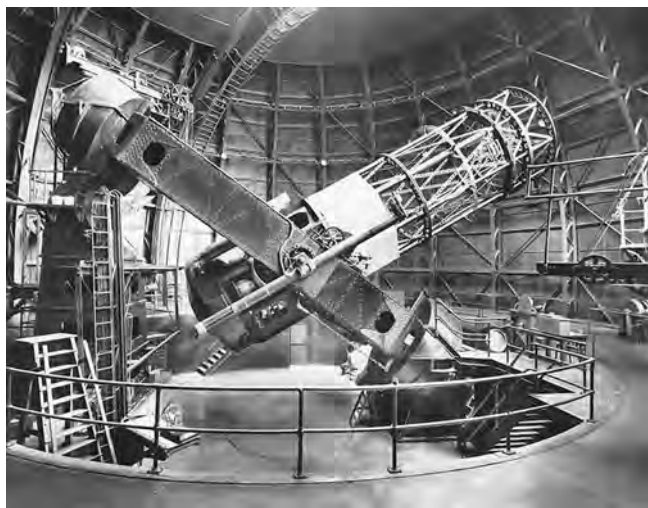


Астрофизик профессор Джордж Хейл.
Чикаго, 1913 г.

¹ Профессор Чикагского университета, редактор «Астрофизического журнала», проводил исследования в Кенвудской астрономической обсерватории в Чикаго, построенной его отцом. В 1908 г. открыл магнитные поля в солнечных пятнах, установил 22-летний солнечный цикл, лидер в планировании и строительстве нескольких ведущих мировых телескопов: 40-дюймового (15.7-см) в Йоркской обсерватории, 60-дюймового (23.6-см) и 100-дюймового (39.4-см) рефлекторов в Обсерватории Маунт-Вильсон, 200-дюймового (78.7-см) рефлектора в Паломарской обсерватории. Он сыграл ключевую роль в создании Международного союза сотрудничества в исследовании Солнца и Национального исследовательского совета, а также в превращении Калифорнийского технологического института в ведущий исследовательский центр в области астрофизики.

по диаметру зеркала телескопы обсерватории, получившей название Маунт-Вилсон. Вначале это был рефлектор с зеркалом 1.51 м («первый свет»²

² Первое использование телескопа для создания астрономического изображения после того, как он был построен. Часто это не первые наблюдения с помощью телескопа, а оптические тесты, выполненные в дневное время для корректировки.



Телескоп им. Джона Хукера диаметром 254 см в обсерватории Маунт-Вилсон. Крупнейший телескоп мира в США с 1917 по 1948 г. Фото 1921 г.

в 1908 г.), потом с зеркалом 2.54 м, который торжественно открыли в конце 1917 г., позднее назвав в честь мецената Джона Хукера, который выделил на постройку этого телескопа 45 тыс. долларов. Британские астрономы и оптики попытались взять реванш, но свой 1.88-метровый рефлектор, который установили в апреле 1918 г. в обсерватории Доминьонской астрофизической обсерватории в г. Виктория (Канада), смогли запустить только через несколько месяцев после американского гиганта на горе Маунт-Вилсон. В 1928 г. Джордж Хейл при финансовой помощи фонда Рокфеллера приступил к реализации проекта телескопа с зеркалом диаметром 5 м.

Европейцы о таких проектах тогда могли только мечтать. В большинстве стран Европы, потрясенных Первой мировой войной, средств для постройки таких телескопов не имелось. Поэтому все ограничивались апертурой около 1 м, хотя британцы поставили еще один 1.88-метровый телескоп в Канаде незадолго до Второй

мировой войны. Впрочем, в США кроме обсерватории Маунт-Вилсон (она принадлежал тогда Калифорнийскому технологическому университету)³, а также позже построенной Маунт-Паломар (Калифорнийский технологический университет и Институт Карнеги) было множество других, которые после открытия этих телескопов, сразу же отошли на второй, а то и третий план. Особенно «обидно» было таким ведущим обсерваториям, как Гарвардская или Ликская. Последняя считалась колыбелью астрофизики, с 1888 г. она

имела один из крупнейших рефракторов США – 36-дюймовый (91 см), с фокусным расстоянием 17.6 м⁴, однако рефлектор с апертурой 0.9 м также был одним из крупнейших в конце XIX в. И вдруг произошел резкий откат в аутсайдеры.

Поэтому эти, как и другие, обсерватории США решили начать строить телескопы, которые, хотя и не затмят размером гиганты Маунт-Вилсон, а позднее и Маунт-Паломар, то хотя бы смогут давать возможности полноценных конкурентных исследований в области планетной, галактической и внегалактической астрономии, где размер апертуры имеет решающее значение. Эта концепция с подачи профессора астрономии Хирама Перкинса стала называться «второй телескоп Америки».

³ История строительства обсерватории Маунт-Вилсон: <https://www.mtwilson.edu/history/>

⁴ Соломонов Ю.В., Герасютин С.А. Крупнейшие рефракторы мира // Земля и Вселенная. 2020. № 2 (332). С. 94.

САМЫЙ БОЛЬШОЙ ТЕЛЕСКОП ЗАПАДНЕЕ ТЕХАСА

Первой такой проект стала реализовывать Гарвардская обсерватория, принадлежащая одноименному университету и являющаяся одной из старейших в США. Она долгое время была на первых ролях в астрономии в свете: здесь был получен в ночь с 16 на 17 июля 1851 г. первый в мире снимок звезды, открыты спутники Сатурна Гиперион и Феба, начались пионерские работы по исследованию переменных звезд и туманностей. Да и когда-то самый большой телескоп в США, рефрактор с линзой 38 см, также принадлежал этой обсерватории. В начале XX в., во время директорства профессора Эдуарда Пикеринга (1846–1919), Гарвардская обсерватория приобрела два 1.5-метровых зеркала у британского оптика Эдрю Коммона (1841–1903). В свое время Коммон пытался построить крупнейших телескоп своего времени, но вот получить хорошее качество зеркала у него не получилось, и после его смерти наследники стали искать покупателей на его изделия, но у британцев денег не оказалось, тогда как у Пикеринга они нашлись. Гарвардские астрономы вновь собрали телескоп Коммона, поставили его на южную станцию в Аргентине в 1911 г., но его качество действительно оказалось неудовлетворительным, да и климат в Аргентине был не столь благоприятным.

Решение о модернизации аргентинского телескопа и постройки еще одного началось директором Гарвардской обсерватории Харлоу Шепли (1885–1972 г.)⁵, сразу же после Первой мировой войны. Тот долгое время работал



Американский астроном Эдуард Пикеринг.
1880-е гг.

в обсерватории Маунт-Вилсон, спорил с известным астрофизиком Эдвином Хабблом (1889–1953)⁶, в честь которого назван Космический телескоп NASA, запущенный в 1990 г.⁷, в итоге он покинул эту обсерваторию, получив приглашение возглавить в 1921 г. обсерваторию Гарвардского колледжа. Для продолжения спора с Хабблом, да и для исследования туманностей, Шепли требовались большие инструменты. Средств на постройку такого гиганта, как 2.5-метровый рефлектор, не нашлось. Но, будучи довольно активным администратором и связанным с политическими и промышленными кругами США, ему удалось найти финансиру-

⁶ Шаров А.С. Эдвин Хаббл – дела и жизнь (к 100-летию со дня рождения) // Земля и Вселенная. 1989. № 5. С. 48–53.

⁷ Сильченко О.К. Космический телескоп им. Э. Хаббла – новая эпоха внегалактической астрономии (к 20-летию работы КТХ) // Земля и Вселенная. 2010. № 6. С. 17–36.

⁵ Ефремов Ю.Н. Харлоу Шепли // Земля и Вселенная. 1966. № 2. С. 44–47.



Телескоп им. Уайэта диаметром 155 см в обсерватории Ок-Ридж – самый большой западнее Техаса в 1955 г.

ние на модернизацию и постройку инструментов Коммона⁸. В 1926 г. на средства фонда Рокфеллера удалось перевести наблюдательную станцию из Аргентины в более благоприятные условия в Южную Африку (Блумфонтейн, ЮАР), где построили астрономическую станцию им. Бойдена. Этих средств хватило и на модернизацию 1.54-метрового телескопа. «Первый свет» на новом месте он увидел в 1933 г. и получил имя в честь Рокфеллера. Другой телескоп, также построенный с использованием зеркала Коммона установили в США в специальной построенной обсерватории Ок-Ридж западнее Бостона (штат Массачусетс). Причем его зеркало было чуть больше – 1.55 м – расположенного

в южном полушарии, правда, его качество так же было неважным, поэтому в 1936 г. его заменили новым, отлитым уже в США. Назвали телескоп в честь мецената Уайета, биография которого затерялась где-то в глубоких архивах Гарварда, а неофициально его называли самым большим телескопом восточнее Техаса. Проработал телескоп-рефлектор до 2005 г. и был законсервирован. Согласно отчетам туристов, которые в наше время попадают в эту обсерваторию, она фактически заброшена и инструменты пропадают. Но было время, когда на нем наблюдали переменные звезды и галактики. В 1980-е гг. с его помощью вели поиски астероидов, в 1990-е гг. и до закрытия обсерватории – внесолнечные планеты (экзопланеты).

«ЧТОБЫ ПРЕВОСХОДИЛ ВСЕ ДРУГИЕ, КРОМЕ 100-ДУЙМОВОГО»

Прежде чем попасть в Ок-Ридж, зеркало Эндрю Коммона с 1925 г. по 1931 г. использовалось в телескопе обсерватории частного Уэслианского университета (колледжа) Огайо в Делавэре, пока шла сложная отливка еще большего по размеру зеркала (1.54 метра), купленного на средства профессора, предпринимателя и мецената Хирама Миллса Перкинса (1833–1924). Перкинс был религиозным человеком и считал, что «у публики должна быть возможность увидеть в большой телескоп небесные объекты, которые максимально раскрывает такой инструмент, и тем самым научиться любить Бога и служить Ему более приемлемым образом». Практически сразу же после основания Уэслианского университета он стал в нем одним из его ведущих преподавателей астрономии и математики. Когда началась Гражданская война в США, Перкинс записал доброволь-

⁸ Биография и зеркала Эндрю Коммона: https://en.wikipedia.org/wiki/Andrew_Ainslie_Common

цем к «северянам», но был забракован из-за недостаточной массы тела. Тогда он вернулся к себе на ферму, где начал активно разводить свиней, которыми шли на корм армии северян. На поставках свинины он сколотил к 1896 г. довольно большое состояние, при этом, являясь аскетом в жизни, жил лишь на зарплату преподавателя. В итоге его большую часть он пожертвовал родному университету на постройку обсерватории, которую называли его именем, но позже переименовали в Студенческую. Все дело в том, что к 1923 г. он завещал еще большую сумму на постройку более крупной обсерватории, но в завещании было одно важное условие: зеркало должно было быть отлито в США! Однако никогда такие зеркала в США не создавали. Если Кларки и Браширы научились лить линзы с диаметром около метра⁹, то с зеркалами такого же диаметра, не говоря о больших, никто дело не имел. Джордж Хейл использовал заготовки, созданные во Франции, тогда как 0.9-метровый рефлектор Ликской обсерватории, как и Гарвардские рефлекторы, использовали зеркала британца Каммона. Понимая, что вряд ли американские оптики смогут превзойти зеркало диаметром 2.5 м, Перкинс сделал уточнение: телескоп должен быть больше всех других в этой стране, кроме 100-дюймового.

Закладку обсерватории, в которой участвовал сам меценат, начали в 1923 г. С зеркалом вышла заминка. Первоначально служащие оптики Бюро стан-



Профессор Уэслианского университета Огайо
Х. Перкинс. Делавэр.
Фото XIX в.

дартов США решили ориентироваться на 1.55-метровое зеркало Коммона, лишь увеличив свое на несколько миллиметров, но сразу даже этого не получалось: первые четыре отливки ломались и трескались практически сразу. Тогда решили изменить технологию, которая позволила с пятого раза отлить зеркало даже больше первоначального проекта – 1.75 м. Отливку сделали в 1929 г., потом почти три года занимались полировкой и в 1931 г., наконец, установили зеркало на телескоп, вернув прежнее в Гарвард. На тот момент телескоп по размеру



Телескоп им. Хирама Перкинса диаметром зеркала 175 см в обсерватории Перкинса в Делавэре (штат Огайо). Второй телескоп по размерам в США с 1932 по 1939 г.
Фото второй половины XX в.

⁹ Соломонов Ю.В., Герасютин С.А. Крупнейшие рефракторы мира // Земля и Вселенная. 2020. № 2 (332). С. 88–100.

зеркала стал вторым в США и третьим в мире¹⁰. При этом, согласно завещанию Перкинса, он стал доступен и для публичных наблюдений.

В 1961 г. из-за роста засветки телескоп перевезли во Флагстафф в Аризоне на обсерваторию Персиваля Лоуэлла. Через три года 1.75-метровое зеркало было заменено на 1.83 м. Однако впоследствии и Уэслианский университет, и Университет штата Огайо, на паях с которым содержался с 1935 г. инструмент, перестали финансировать его обслуживание. Телескоп был закрыт в конце 1980-х гг., пока в 1998 г. Бостонский университет не заключил договор с обсерваторией Лоуэлла на его использование, выкупив его на свой баланс через 20 лет.

В ЧЕСТЬ ОТТО СТРУВЕ

Большая часть работ, выполненных на 1.75-метровом телескопе обсерватории Перкинса в Делавэре (штат Огайо), пришлось на времена директорства Николая Федоровича Бобровникова (1896–1988), эмигранта из Российской империи. Другой российский эмигрант из старейшей династии российских астрономов, крупнейший астрофизик Отто Людвигович Струве (1897–1963), стал инициатором постройки следующего «второго телескопа США», который превзошел по своим размерам телескоп Хирама Перкинса.

В 1926 г. в США скончался видный банкир Уильям Джордж Макдональд, который завещал Техасскому университету 850 тыс. долларов (для сравнения Перкинс завещал лишь 250 тыс.). Он тоже был участником Гражданской войны, только в отличие от Перкинса воевал на стороне «южан». И если



Отто Людвигович Струве – американский астроном, директор Йеркской обсерватории в 1932–1947 гг. Фото 1923 г.

у мецената–«северянина» наследников не было, то у Макдональда оказалось довольно много, так что университету пришлось с ними судиться некоторое время. Суд университетские юристы выиграли, и когда телескоп Перкинса уже «увидел свой первый свет», то Техасский университет только начал постройку собственной обсерватории, пригласив для его реализации Отто Струве. Он вел курс астрономии в Чикагском университете, которую в Техасе не преподавали. Именно Струве из своих учеников сформировал первый штат новой обсерватории и провел первые расчеты для инструмента.

Телескоп заказали оптической компании «Warner & Swasey», которая занималась шлифовкой и полировкой телескопа Перкинса. Вот только опыта постройки заготовки и доведения до готового столь большого зеркала у них не было. С 1922 г. они пытались построить для Кордовской обсервато-

¹⁰ Краткая история Обсерватории Перкинса: <https://observatoriesofohio.org/perkins-observatory/>

рии Аргентины 1.54-метровое зеркало (по-видимому, заготовку делали для обсерватории Перкинса), но даже с ним возникли большие проблемы, которые так и не были решены: в итоге аргентинцам и отдали его в начале 1942 г. не полированным.

Но в 1933 г. та же компания взялась за создание еще большего телескопа, невзирая на первую, неудачную попытку отлить зеркало. Ей занимался ученик Альвана Кларка – Карл Лундин-младший, принимавший участие в отливке линзы знаменитого метрового рефрактора обсерватории Йеркса Чикагского университета (штат Висконсин). При отливке зеркало после остывания покрылось трещинами. Лундин предложил зашлифовать, но Отто Струве отказался и сказал, что надо отливать заново. Вторая попытка оказалась удачнее, при этом зеркало оказалось чуть больше, чем планировали изначально, вместо диаметра 2.0 м удалось сделать 2.1 м. Правда, качество оказалось значительно хуже, чем у зеркал, которые из французских заготовок сделал Хейл.

Дизайн всего телескопа также был разработан Отто Струве. Как отмечают архитекторы, по своему внешнему виду он вообрал в себя черты труб телескопов Маунт-Вилсон и британского истребителя «Спитфайр» (Supermarine Spitfire), появившегося в 1938 г. Несмотря на то, что ко времени его постройки уже была разработана более передовая рефлекторов системы Ричи-Кретьена, инструмент делали по классической для всех больших телескопов тех лет схеме Кассегрена.

В мае 1939 г. состоялось торжественное открытие 2.1-метрового телескопа и обсерватории им. Макдональда в Техасе. Инструмент на тот момент стал вторым по размеру в США и в мире, превзойдя оба канадских рефлектора фирмы Граба с диаметрами зеркал 1.88-м, установленных в Доминьонской



Телескоп им. Отто Струве диаметром 210 см обсерватории им. Макдональда – второй по размерам в США и в мире с 1939 по 1948 г. Фото 1970-х гг.

обсерватории и обсерватории имени Дэвида Данлэпа. С его помощью Джерард Койпер (1905–1973)¹¹ обнаружил в 1948 г. пятый спутник Урана Миранду, в 1949 г. второй спутник Нептуна Нерейду, подтвердил наличие атмосферы Титана и уточнил ее состав и даже закрыл проблему каналов на Марсе: наблюдая в разные противостояния планеты, он отметил, что не видит никаких каналов. В 1939–1947 гг. обсерваторию им. Макдональда возглавлял Отто Струве. В 1966 г. этот инструмент получил имя мецената, а ровно через два года в обсерватории вступил в строй второй инструмент с диаметром зеркала 107 дюймов (2.7 м), получившего имя первого директора астронома

¹¹ Герасютин С.А., Рускол Е.Л. Джерард Койпер (к 110 летию со дня рождения) // Земля и Вселенная. 2015. № 6. С. 50–58.



Дональд Шейн около 3-метрового зеркала Ликской обсерватории. Фото 1950-х гг.

Харлана Джона Смита (1924–1991), руководившего строительством телескопа. Однако в эти годы он не стал «вторым инструментом Америки».

РЕВАНШ ЛИКСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

В 1887 г. была построена Ликская обсерватория на средства, полученные Калифорнийским университетом (не путать с технологическим!) по завещанию американского магната и филантропа Джеймса Лика (1796–1876)¹². Первый ее телескоп был 0.3-метровый рефрактор, а в самом начале 1888 г. здесь вступил в строй 0.9-метровый рефрактор в этот период крупнейший в мире. В 1895 г. британский политик Эдвард Кроссли (1841–1905) то ли передал в дар, то ли продал обсервато-

рии свой рефлектор диаметром зеркала 0.9 м, построенным Эдрю Коммоном. Его основательно переделали и превратили в астрограф, открыв множество туманностей и даже начав спектральные исследования звезд. Астрономы Ликской обсерватории считали себя пионерами таких исследований в США. Но вскоре они оказались сначала на вторых ролях, а потом и на третьих. Уже в 1920-е гг. их рефлектор не мог конкурировать с инструментами Маунт-Вилсона и Гарвардской обсерватории. Денег на постройку телескопа у Калифорнийского университета не оказалось. Однако, в 1945 г. директором Ликской обсерватории становится Дональд Шейн (1895–1983), довольно инициативный человек, который «выбил» на постройку крупного инструмента деньги у правительства штата Калифорния! Он происходил из потомков ирландский переселенцев, которые осваивали в XIX в. Диккий запад. Многие из его предков были учителями. В 1910 г. семья переехала в Окленд (штат Калифорния), здесь он в 1915 г. получил образование по специальности астроном в Калифорнийском университете, учился в аспирантуре, получив докторскую степень. Интерес к этой науке у него появился в десятилетнем возрасте под влиянием дяди Эдгара, который показывал ему звездное небо и читал популярные книги тех лет. С 1916 по 1920 г. работал в Ликской обсерватории, занимаясь изучением Солнца и переменных звезд.

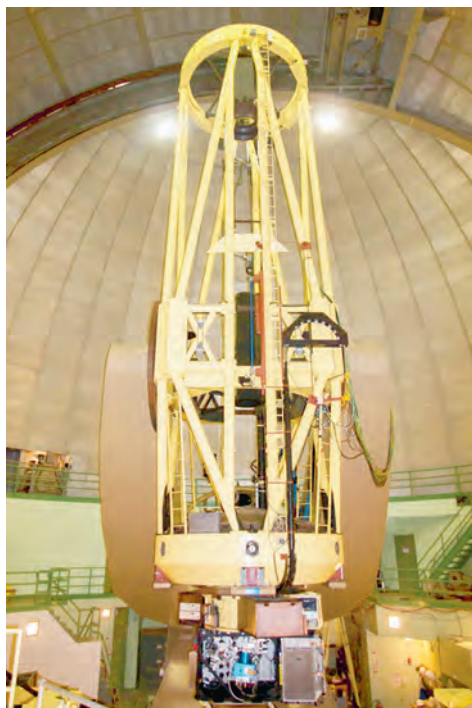
Заготовка зеркала диаметром 3 м была тестовой, ее сделали при отливке 5-метрового зеркала обсерватории Маунт-Паломар, находящейся в округе Спн-Диего (Калифорния). Во время подготовки 3-метрового зеркала Паломарский 200-дюймовый (5.1 м) телескоп-гигант был почти готов. Свой «первый свет» он увидел в 1948 г., став тогда крупнейшим в мире и в США. Прошлый рекордсмен, 2.5-метровый

¹² Исторические телескопы Ликской обсерватории: <https://www.lickobservatory.org/explore/historical-telescopes/>

телескоп Маунт-Вилсон, стал «вторым инструментом Америки». Купил заготовку Дональд Шейн даже дешевле себестоимости, впрочем, иных покупателей не было. Другую заготовку диаметром 2.5 м Америка подарила британцам, а они создали из нее телескоп им. Исаака Ньютона в обсерватории на о. Ла-Пальма (Канарские острова).

Полировали и шлифовали зеркало для очередного «второго телескопа Америки» сами оптики и астрономы Ликской обсерватории прямо на месте его установки, на горе Гамильтон высотой 1283 м, в 46 км от г. Сан-Хосе (Калифорния), благодаря тому что у Ликской обсерватории давно работали оптические мастерские. Этот инструмент, как и 2.1-метровый телескоп им. Отто Струве, построен по схеме Кассегрена. Его зеркало сделали примерно за 5 лет, а всю конструкцию вместе с башней собирали 15 лет. В 1959 г. состоялось его торжественное открытие. В середине XX в. он стал вторым по размерам в США и в мире. В дальнейшем его постоянно модернизировали: он стал одним из первых телескопов с активной и адаптивной оптикой¹³, одним из первых, кто получил ПЗС-приемник.

В 1930-е гг. фонд Карнеги выделил Ликской обсерватории средства на постройку астрографа под проект Дональда Шейна для определения движения собственных движений звезд. Это был классический двойной 51-сантиметровый рефрактор с объективами, названный в честь Карнеги. Строил его знаменитый оптик Франклин Райт, а окончательную доводку провел сам Шейн. Заработал инструмент только в 1947 г., и частично это было связано



Телескоп им. Дональда Шейна диаметром 305 см в Ликской обсерватории. Второй телескоп по размерам в США и в мире с 1959 по 1973 г. Фото 1970-х гг.

со Второй мировой войной. В это время Шейн занимался Манхэттенским проектом, а другие астрономы обсерватории в столь рутинных наблюдениях не были заинтересованы.

После создания ядерной бомбы Дональд Шейн вернулся в обсерваторию, был назначен ее директором и возглавлял до 1958 г. Когда 3-метровый телескоп был уже на завершающей стадии, сам он занялся постройкой национальной обсерватории Китт-Пик, расположенной в 88 км от Тусона (штат Аризона)¹⁴. Имя Шейна некогда «второму телескопу Америки» присвоили в 1978 г.

¹³ Лукин В.П. Адаптивная оптика для астрономических наблюдений // Земля и Вселенная, 2013. № 4. С. 14–32.

¹⁴ 50-лет обсерватории Китт-Пик (архив): <http://www.noao.edu/kp50/files/Timeline.pdf>

В 1958 г. почти десяток университетов США по настоянию научного фонда на вершине горы Кит-Пик высотой 2098 м начали строительство национальной обсерватории, которая стала самой крупной по числу инструментов в США. Отметим, что аналогичную обсерваторию, основанную в 1970 г., построили и в СССР в 1980-е гг. на горе Майданак высотой 2650 м в Узбекистане – это Майданакская станция ГАИШ МГУ с астрографом и двумя телескопами – 60-сантиметровым Цейс-600 и 1.5-метровым АЗТ-22. В Европе ее аналогом стали Северная и Южная Европейские обсерватории.

Постройка Китт-Пик была довольно быстрой. Уже в 1960 г. здесь установили первый инструмент – 0.9-метровый рефлектор, на котором впоследствии довольно эффективно занимались поисками околоземных астероидов. В сентябре следующего года здесь «увидел первый свет» рефлектор с зеркалом диаметром 2.1 м. В тот же год было принято решение о строительстве 4-метрового телескопа по схеме Ричи-Кретьена. Главным инициатором постройки этого инструмента стал американский исследователь туманностей и галактик Николас Ульрих Мейол (1906–1993), в честь которого впоследствии этот телескоп и назвали.

Личность доктора Николаса Мейола довольно интересна. В молодые годы он не интересовался астрономией, хотя как председатель школьного научного клуба вместе с одноклассниками и посетил Ликскую обсерваторию в 1923 г. Больше его увлекало горное дело. Но на втором курсе Калифорнийского университета, выяснилось, что он страдает дальтонизмом и не различает цвета, без которых заниматься геологией и геохимией невозможно,

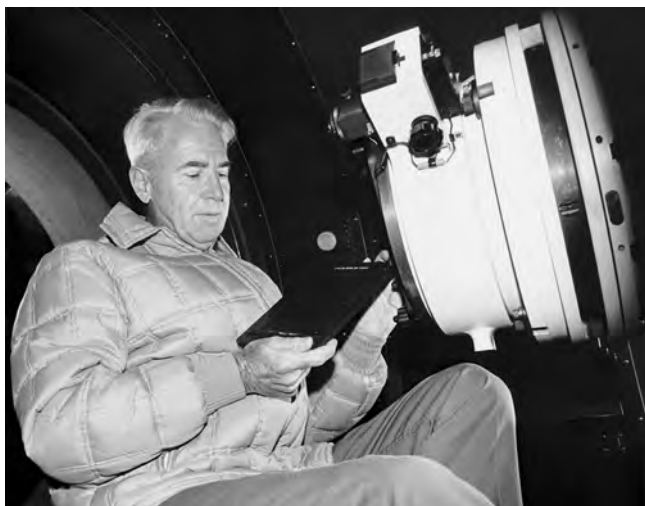
по этой причине почти все лабораторные работы у него не получились. Руководство университета предложило студенту сменить специальность, тогда он выбрал астрономию. Правда, этот выбор был чисто прагматичный, а не романтический, как у большинства астрономов. Перед тем как сменить специализацию, Николас общался с представителями разных профессий, задавая им вопросы, в том числе и насколько довольны они своей зарплатой. Оказалось, что среди астрономов довольных работой и ее оплатой оказалось большинство, что и определило его выбор.

Обсерватория Маунт-Вилсон, особенно после того, как там заработал 2.5-метровый рефлектор, манила всех астрономов мира, не говоря о соотечественниках. После окончания университета Мейолу удалось попасть туда на работу, правда, в качестве вычислителя. Нужно было учиться дальше, получать научную степень, поэтому он вернулся в Калифорнийский университет и для написания диссертации разработал специальный бесщелевой спектрограф¹⁵. Его создали в мастерских Ликской обсерватории и установили на рефлектор Кроссли, а не в Маунт-Паломар, хотя наставником Мейола, а скорее

¹⁵ Устанавливается на больших телескопах, он предназначен для получения спектров слабых объектов (звезд, комет, планетарных туманностей), позволяет одновременно получать спектры нескольких объектов. В отличие от спектрографов, источником света служит не узкая щель, а непосредственно изображение небесного объекта в фокальной плоскости телескопа. Отсутствие потерь света на щели его основное преимущество. Однако из-за неоднородностей земной атмосферы, через которые проходит свет небесного объекта, его изображение в телескопе не вполне точечное, причем оно постоянно колеблется в фокальной плоскости. Это накладывает ограничения на его разрешающую способность, поэтому он используется лишь для исследования непрерывного спектра небесных объектов.

всего, консультантом, был Эдвин Хаббл. С его подачи рефлектор Кроссли удалось эффективно использовать для исследования объектов низкой поверхностной яркости, таких как протяженные газовые туманности и галактики неправильного типа. Но попасть в штат обсерватории Маунт-Вилсон, даже после защиты докторской диссертации, не получилось. В США в это время бушевала Великая депрессия, приходилось ужимать штаты, так что свободных вакансий в самой передовой обсерватории Америки не было. Впрочем, и в Ликской обсерватории дела были не лучше. В итоге, оставшись в ней Мейол невзирая на звание доктора наук оказался лишь с ассистентом астронома с обязанностью уборщика! При этом в эти годы в обсерватории назрел конфликт между молодым поколением астрономов, к ним относился и Николас, и старшим, которое гордилось тем, что, вопреки тому, что их телескоп не самый большой и передовой, по-прежнему на нем удается получать выдающиеся научные результаты. Хотя в 1930-е гг. наметилось отставание Ликской обсерватории в исследованиях и публикациях, новые крупные инструменты в США и Канаде постепенно вступали в строй, поэтому конкурировать с ними становилось все труднее.

Старшее поколение астрономов все же понимало, что необходимо строить крупные телескопы. Руководство обсерватории на модернизацию имеющегося рефлектора даже пыталось собрать деньги из личных средств и у университета, искало меценатов... Конфликт между молодым и старым



Николас Мейол во время наблюдений на 4-метровом рефлекторе, носящем его имя. Обсерватория Китт-Пик в Аризоне. Фото 1973 г.

поколениями астрономов закончился с началом вступления США во Вторую мировую войну, когда стало не до астрономии. Николас Мейол стал заниматься разработкой радаров, приборами аэрофотосъемки и даже некоторое время принимал участие в Манхэттенском проекте по разработке ядерной бомбы.

После войны с приходом Дональда Шейна на пост директора Ликской обсерватории все изменилось: нашлись деньги на 3-метровый телескоп, который торжественно открыли в 1959 г. Правда, Мейол поработал на нем недолго, получив приглашение перейти в Национальную обсерваторию Китт-Пик, 1 октября 1960 г. он ее возглавил. Это назначение было сделано с подачи Шейна, который к этому времени стал президентом Ассоциации университетов по исследованиям в области астрономии, под эгидой которой и строили Китт-Пик. Несмотря на отсутствие у него опыта администратора, он руководил постройкой телескопа диаметром 3.05 м Ликской обсерватории,



Телескоп им. Николаса Мейола диаметром 401 см в обсерватории Китт-Пик. Второй телескоп по размерам в США в 1973–1993 гг. и в мире с 1973 по 1976 г. Фото начала 2000-х гг.

и даже его проектированием. В 1968 г. началось строительство площадки под новый «второй телескоп США». В 1971 г. на вершину Китт-Пик с помощью специально созданных грузовиков привезли заготовку для зеркала, которое было изготовлено компанией «Owens-Illinois». Интересно, что компания не производила астрономическую оптику, она занималась изготовлением стеклянной тары, впоследствии – выпуском плазменных дисплеев. Шлифовку и полировку зеркала производили уже в мастерских Китт-Пик. Летом 1973 г. состоялось торжественное открытие телескопа диаметром 4 м, которому присвоили имя Мейола. К тому времени он вышел на пенсию, но принял активное участие в качестве консультанта во время постройки телескопа и провел на нем первые наблюдения. В 1976 г. в Чили был построен брат-близнец 4-метрового телескопа

им. Николаса Мейола, получивший имя пуэрториканского астронома Виктора М. Бланко.

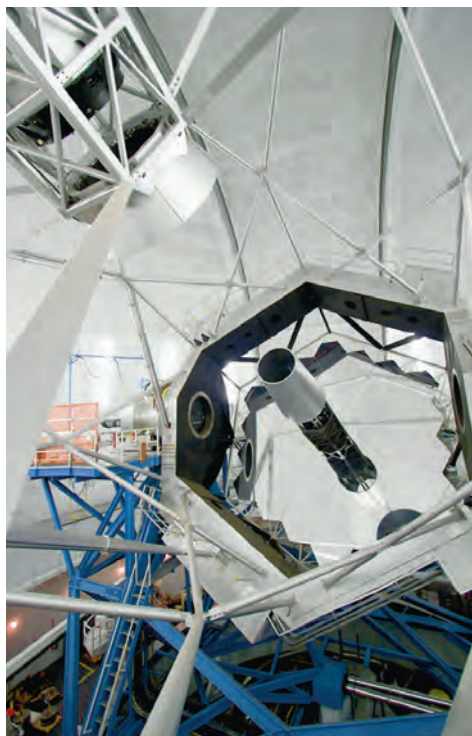
КОГДА ХЕЙЛ СТАЛ «ВТОРЫМ»

Гордость американской астрономии 5-метровый телескоп Маунт-Паломар строили 22 года и торжественно открыли в 1948 г. С середины XX в. он становится крупнейшим телескопом, пока в конце 1975 г. не был создан в Нижнем Архызе (Карачаево-Черкессия) крупнейший в Евразии советский БТА-6 – большой альтазимутальный телескоп САО АН СССР диаметром зеркала 6 м¹⁶.

¹⁶ Иоаннисиани Б.К. Первый альтазимутальный телескоп с 6-метровым зеркалом // Земля и Вселенная. 1977. № 6. С. 48–53. Снежко Л.И. Первые десять лет работы БТА // Земля и Вселенная. 1987. № 6. С. 12–17; Пономарёв Д.Н. Астрономические обсерватории Советского Союза. М.: Наука, 1987. С. 82–93.

Уже тогда стало ясно, что развитие монолитных зеркал достигло своего предела в рамках технологий тех лет. Большого размера зеркала из монолита не могли получаться жесткими, и прогнулись бы под собственным весом, нужно было искать новые решения. Выход из положения нашли в создании телескопов, состоящих из нескольких зеркал. Первым из них стал Многозеркальный телескоп ММТ (Multiple Mirror Telescope) Обсерватории Фреда Уиппла в Аризоне (США), состоящий из 6 зеркал размером 1.8 м, вступивший в строй в 1978 г. Его поверхность была эквивалентна монолитному зеркалу диаметром 4.5 м. Отметим, что в СССР аналогичные разработки вели на базе Крымской астрофизической обсерватории, одним из таких инструментов стал АСТ-1200 – его 1.2-метровое зеркало состояло из семи шестиугольных элементов. Правда, развитие проект так и не получил.

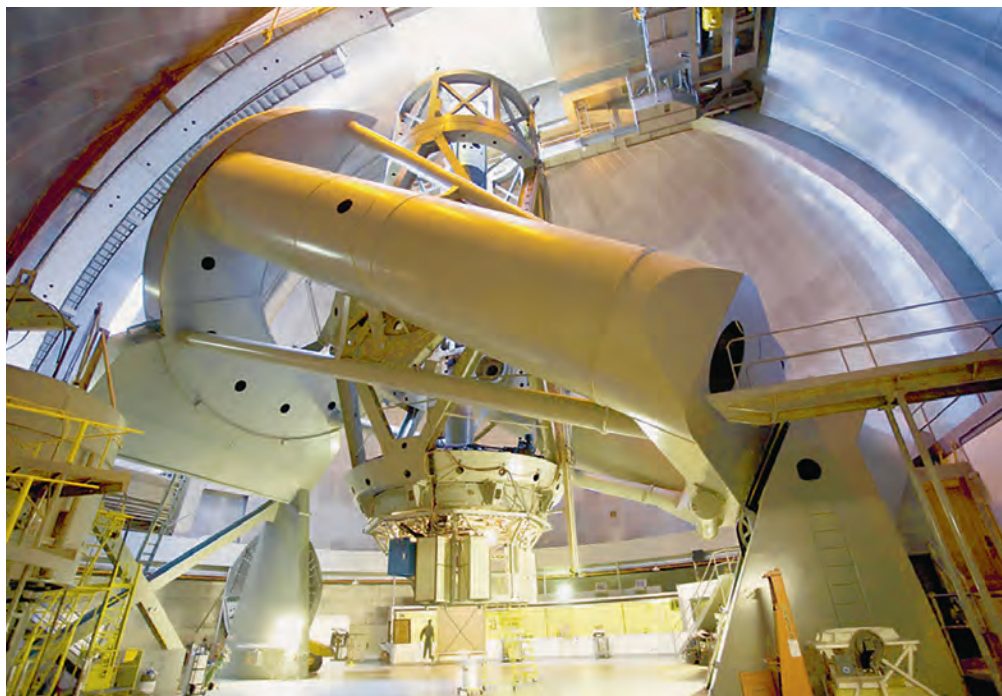
Во время постройки ММТ конструкторы Терри Маст и Джерри Нельсон предложили концепцию большого телескопа со сборным зеркалом из нескольких сегментов. Отметим, что впервые концепцию сегментации зеркала выдвинул до Второй мировой войны итальянский астроном Гвидо де Артуро (1879–1967), в 1952 г. он изготовил даже небольшой рабочий телескоп. В 1985 г. благотворительный фонд Уильяма Кека выделил под реализацию идеи Маста и Нельсона 70 млн долларов (сравните с суммами, которые выделяли Хукс, Маккормик или Перкинс!). С сентября 1985 г. началась постройка обсерватории им. Уильяма Кека на вершине горы Мауна-Кеа высотой 4145 м на Гавайях. 24 ноября 1990 г. первый сегментарный телескоп увидел «первый свет», но зеркало тогда смонтировали не полностью, вместо



Сегментное зеркало диаметром 10 м телескопа «Кек-2» обсерватории им. Кека. Фото 2007 г.

36-сегментов, собрали в единое целое только девять. Успех первых испытаний позволил получить и дальнейшие финансирование, и средства на постройку второго такого же инструмента.

Гигантские телескопы диаметром 10 м обсерватории им. Кека заработали: «Кек-1» в мае 1993 г., «Кек-2» – в октябре 1996 г. Их зеркала состоят они из 36 шестиугольных сегментов поперечником 1.8 м. Как БТА-6 или ММТ их монтаж соответствовал альтимутальной, в то время как у всех остальных телескопов США, построенных до ММТ, была вилочная экваториальная английской системы. В зеркалах «Кек-1» и «Кек-2» использовалась схема Ричи-Кретьена, как у телескопов Николаса Мейола и Виктора Бланка.



*Телескоп им. Джорджа Хейла диаметром 508 см в обсерватории Маунт-Вилсон.
Крупнейший телескоп мира в 1948–1976 гг. и в США в 1948–1993 гг. Фото начала 2000-х гг.*

В 1993 г. знаменитый 5-метровый телескоп Маунт-Паломар, который к тому времени получил имя в честь Джорджа Хейла, стал «вторым телескопом США», но по-прежнему, оставаясь самым большим на континенте и крупнейшим, на котором установлено монолитное зеркало.

В 1996 г., когда увидел «первый свет» 10-метровый «Кек-2», телескоп Хейла стал третьим по размеру в США и вторым на континенте. 10 декабря того же года «первый свет» увидел телескоп им. Хобби-Эберли, установленный в обсерватории Макдональда. Его главное зеркало состояло из 91 шестиугольного сегмента размером 1 м. Формально это зеркало тогда было больше – 11.4 м, чем у телескопов «Кек», но использовался диаметр только 9.2 м, что собственно и делало

его вторым в США. После реконструкции, проведенной в 2015 г., удалось получить рабочую поверхность зеркала 10 м, что сравняло его с телескопами «Кек».

20 мая 2000 г. телескоп им. Джорджа Хейла в обсерватории Маунт-Вилсон стал вторым с монолитным зеркалом телескопом в США. Аризонский университет провел серьезную модернизацию телескопа ММТ и вместо 6 зеркал, он получил одно, монолитное диаметром 6.5 м. Однако, первым «монолитом» он был недолго. Через год, заработал 8.1-метровый телескоп «Джемени-Север», установленный на Гавайских островах, в 2004 г. в обсерватории Маунт-Грэм заработал Большой бинокулярный телескоп, где стоят два монолитных зеркала диаметром 8.4 м. Но это уже другая история...

О ПРОГНОЗЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ В ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ

СОЛОВЬЁВ Анатолий Александрович,

член-корреспондент РАН

Геофизический центр РАН, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта

DOI: 10.7868/50044394824030071

ВВЕДЕНИЕ

Сегодняшняя цивилизация весьма уязвима к кризисам, возникающим в результате экстремальных событий, порожденных сложными и плохо изученными системами. Иерархические сложные, нелинейные системы непрерывно порождают экстремальные события, которые представляют собой редкие, быстрые изменения, оказывающие сильное влияние на систему и ее окружение. В зависимости от контекста, такие события также называют критическими явлениями, бедствиями, катастрофами и кризисами. Примеры включают природные стихийные бедствия, внешние и гражданские войны, террористические атаки, волны преступности, экономические спады, голод и многое другое. Современному обществу угрожают и более тонкие последствия таких событий, например, его неготовность проводить политику, отвечающую таким вызовам, как изменение климата, бедность и истощение ресурсов.

Наша способность прогнозировать ход событий в сложных системах по своей сути ограничена. Вместе с тем, на протяжении последних 50 лет группой исследователей из более чем 20 учреждений в 12 разных странах, включая институты Российской акаде-

мии наук, развивался весьма перспективный подход к прогнозированию и пониманию сложных систем. Он зародился благодаря интеграции исследований в области естественных и социальных наук с привлечением прогнозного математического аппарата. Этот подход и целый ряд его практических применений были изложены в книге «Prediction of Extreme Events in Nature and Society», опубликованной в 2018 г. под редакцией чл.-корр. РАН Ал.Ан. Соловьёва, который долгие годы (с 1998 по 2017 г.) возглавлял Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. Дело в том, что первоначально данный подход успешно применялся именно в анализе природных стихийных бедствий, таких как землетрясения в литосфере. Однако в дальнейшем он был развит до алгоритмических прогнозов не только природных, но и экстремальных социально-экономических и политических событий. К ним относятся сохранение правящей политической партии у власти на выборах, экономическая рецессия, всплеск безработицы и вспышки преступности. Прогноз основывается на эвристическом поиске явлений (или паттернов) по комплексу признаков, предшествующих критическим событиям, в результате которого формулируется строго определенный алгоритм прогноза. Этот алгоритм

выбором «да или нет» указывает в любой момент времени, следует или нет ожидать критическое событие в последующий период времени. Используемой методологией является распознавание образов для случая малых выборок. Данные, по которым строятся алгоритмы прогноза, включают фоновую сейсмичность (в случае литосферы), макроэкономические индикаторы (в случае экономических систем) и статистику разных типов преступности (в случае мегаполисов). Исследования в данном направлении, несомненно, способствуют своевременному реагированию и предотвращению надвигающихся кризисов. Продвинутое прогнозирование расширяет наше понимание мировых процессов и содействуют развитию мер, способствующих устойчивой жизнедеятельности.

ПРОГНОЗНОЕ ПОНИМАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ НА ПРИМЕРЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Экстремальные события, также известные как критические переходы, бедствия, катастрофы и кризисы, являются редкими точечными событиями с низкой вероятностью возникновения, но обладающими большим воздействием на окружающую среду. Они непрерывно возникают в хаотических, сложных системах, формирующихся отдельно или совместно природой и обществом. Задача состоит в том, чтобы спрогнозировать, когда и где произойдет экстремальное явление. Прогноз имеет смысл только в том случае, если оценена его точность. Необходимость решения этой задачи во многом обусловлена уязвимостью общества перед экстремальными событиями, которая обостряется в связи с усилением роли объектов высокого риска и ростом неустойчивости «глобальной деревни» (по Маршаллу Маклюэну).

Все рассматриваемые экстремальные события порождаются иерархическими диссипативными сложными системами. В качестве примера такой системы можно привести земную литосферу, экстремальными событиями которой являются сильные землетрясения. Ее структура представляет собой иерархию объемных блоков, перемещающихся относительно друг друга. Так, самые крупные блоки характеризуются размерами нескольких тектонических плит. Каждый блок последовательно вмещает в себя все более мелкие блоки, вплоть до размеров, соответствующих примерно 10^{25} зерен породы. Динамика системы тесно связана с накоплением в ней неустойчивостей, вызванным множеством взаимодействующих механизмов, которые действуют в широком диапазоне масштабов – от астрономических до молекулярных. При этом никакой из этих механизмов не является доминирующим. Землетрясением может быть как критическое явление в определенной части сети разломов, так и событие фоновой сейсмичности в большем объеме.

При попытке изучения отдельных аспектов сложной системы с их последующим объединением есть риск потери информации о свойствах всей системы. В частности, не существует фундаментального «прогнозного» уравнения, объединяющего все отдельные взаимодействующие механизмы в системе. Более разумным представляется использовать целостный (холистический) подход, обеспечивающий переход от целого к деталям. Именно он открывает возможность преодоления как сложности самой системы, так и неизбежного несовершенства исходных данных. Для изучения системы в целом необходим выбор соответствующего масштаба пространственно-временного обзора, допускающего сглаживание незначительных деталей в пользу выявления

крупномасштабных структур. Наоборот, при слишком детальном обзоре искомые структуры могут остаться незамеченными.

Необходимость крупномасштабных наблюдений для эффективного прогнозирования землетрясений можно продемонстрировать на примере «паркфилдского» эксперимента, проведенного в начале 1980-х гг. в США. Эксперимент заключался в проведении детальных наблюдений сейсмической активности в Паркфилде, шт. Калифорния. В этой области, которая включает в себя часть разлома Сан-Андреас, землетрясения происходят почти каждые 20 лет, за некоторыми исключениями. Проект включал установку множества датчиков мониторинга тектонического напряжения, микросейсмичности, уровня жидкости и множества других параметров на небольшой территории, где ожидалось следующее паркфилдское землетрясение. Однако следующее землетрясение в этой зоне произошло на 20 лет позже, чем ожидалось, и ни один из датчиков не смог обнаружить никаких предшествующих ему признаков. Однако в течение этого периода имели место сильные землетрясения в других близлежащих регионах – Нортридже, Лома-Приете и др. Участники проекта игнорировали все эти землетрясения, ожидая следующего только в Паркфилде, в то время как им следовало при анализе рассматривать гораздо большую территорию.

Далее было показано, что предвестники, ведущие к сильному землетрясению, должны наблюдаться на площади примерно в 10 раз большей, чем само землетрясение. После этого важного открытия начался первый этап построения алгоритмического прогноза землетрясений. У его истоков стояли академики АН СССР В.И. Кейлис-Борок и выдающийся математик И.М. Гельфанд, а также геоморфолог

Е.Я. Ранцман и американские учёные Л. Кнопов и Ф. Пресс. Ими было показано, что места сильных исторических землетрясений тяготеют к некоторым узлам морфоструктурных линеаментов, определяемых по совокупности геологических, геоморфологических и тектонических данных. До этого считалось, что землетрясения могут возникать только в зонах активных разломов. По этой причине упомянутый Нортридж оказался неожиданным местом землетрясения, поскольку не находился на активном разломе. После Нортриджа с учетом новых представлений о сейсмогенных регионах было выявлено множество других сейсмоопасных мест, не находившихся на активных разломах.

В 1976 г. группой упомянутых ученых была составлена новая карта сейсмической опасности Калифорнии, на которую были нанесены многие районы, которые до этого не рассматривались как потенциальные места сильных землетрясений. В их число вошел и центр Лос-Анджелеса. Для выявления таких «опасных» узлов использовался математический аппарат распознавания образов. С его помощью окрестности всех рассматриваемых узлов морфоструктурных линеаментов были разделены на два класса: те, в которых следует ожидать землетрясения с магнитудой $M \geq 6.5$, и остальные. На рис. 1 выявленные «опасные» узлы показаны желтым цветом, а черными кругами обозначены эпицентры землетрясений, которые произошли до 1976 г. и использовались в анализе. Красными кругами показаны землетрясения, произошедшие после 1976 г. Некоторые из них произошли в районах, которые ранее не считались опасными.

Полная формулировка задачи прогноза землетрясений включает временную составляющую и звучит следующим образом: по данным о динамике

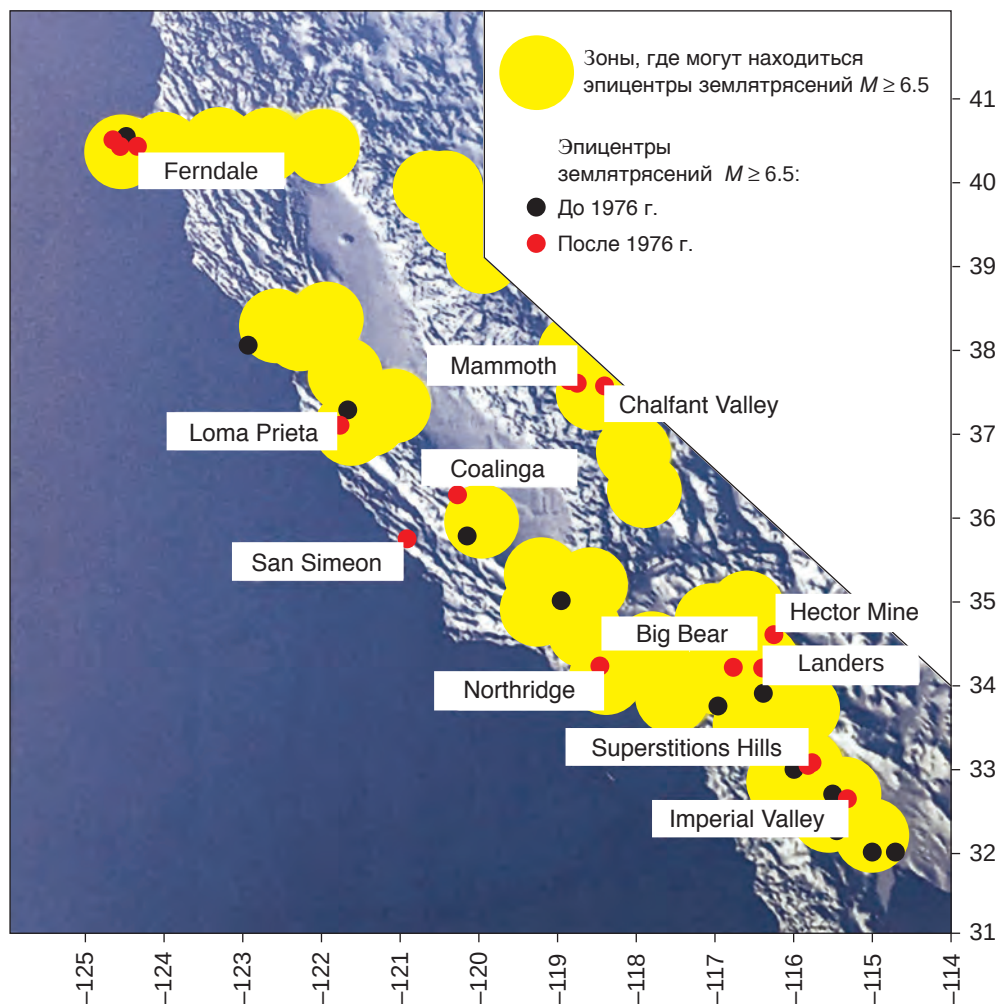


Рис. 1. Зоны возможного возникновения сильных ($M \geq 6.5$) землетрясений (желтый цвет) (из [Gelfand et al., 1976])

фоновой сейсмичности в определенном регионе перед некоторым моментом t необходимо определить, произойдет или нет сильное землетрясение в этом регионе в течение интервала времени $(t, t + D)$. Таким образом, объектом распознавания является момент t , и задача сводится к распознаванию, принадлежит он или нет интервалу времени D , предшествующему сильному землетрясению. Такой прогноз нацелен не на полную дина-

мику сейсмичности, а только на редкие экстраординарные явления – сильные землетрясения, которые определяются пороговым значением магнитуды M_0 . Возможные сценарии такого прогноза схематично показаны на рис. 2.

В соответствие с предложенной схемой был разработан метод среднесрочного прогноза землетрясений «M8» на базе ретроспективного анализа динамики сейсмической активности перед сильнейшими ($M \geq 8.0$)

землетрясениями мира. В алгоритме фоновая сейсмичность характеризуется функционалами, вычисляемыми в круговой области, диаметр которой зависит от M_0 – нижнего порога магнитуды прогнозируемых землетрясений: 384 км, 560 км, 854 км и 1333 км для $M_0 = 6.5, 7.0, 7.5$ и 8.0 соответственно. Шаг вычисления функционалов dt составляет 0.5 года. В число функционалов входят: число основных толчков с магнитудой выше $\underline{M}$ за предшествующие 6 лет (N); отклонение их числа от долговременного тренда (L); линейная концентрация их очагов за предшествующие 6 лет (Z); максимальное за предшествующий 1 год число афтершоков, произошедших в течение 2 дней после основного толчка (B). Каждый из функционалов N, L, Z вычисляется независимо для двух значений $\underline{M}$, которые определяются из условия, что среднегодовое число основных толчков с $M \geq \underline{M}$ равно $\tilde{N}$, для $\tilde{N} = 20$ и

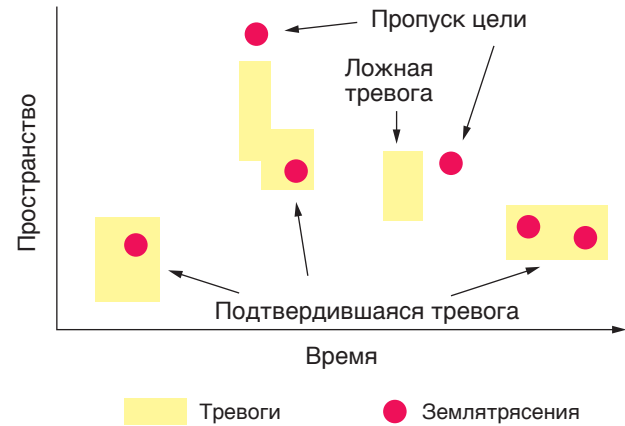


Рис. 2. Возможные сценарии прогноза землетрясений гипотетическим алгоритмом

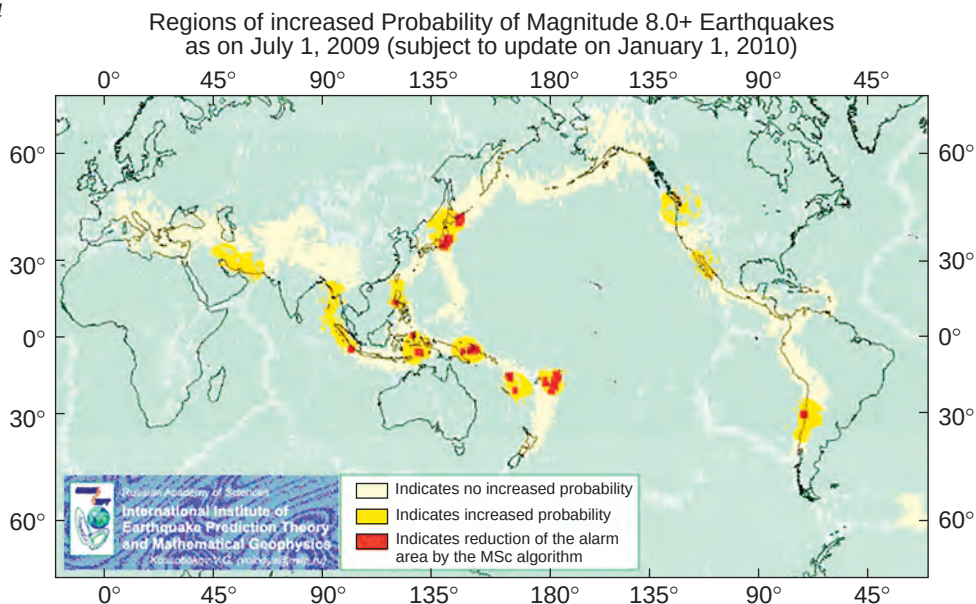
$\tilde{N} = 10$. В результате сейсмический поток в каждой из областей исследования робастно отображается семью функционалами: парами N, L, Z и одним B . Для каждого из семи функционалов по их текущему эмпирическому распределению определяется порог аномально больших значений $T^f(Q)$ из условия, что значения функционала f превосходят $T^f(Q)$ для $Q\%$ рассмотренных моментов времени. Для B был

Таблица 1

Оценка эффективности алгоритмов «М8» и «М8-МSc» в задаче прогноза землетрясений магнитудного диапазона М8.0+ (при оценке уровня доверия использована наиболее консервативная мера объема тревоги, учитывающая эмпирическое распределение эпицентров)

Период теста	Сильные события			Процент объема тревоги p , %		Уровень доверия, %	
	Всего	Предсказано					
		М8	М8-MSc	М8	М8-MSc	М8	М8-MSc
1985–2009	18	13	10	32.93	16.78	99.93	99.98
1992–2009	16	11	8	29.17	14.54	99.88	99.91

a



б

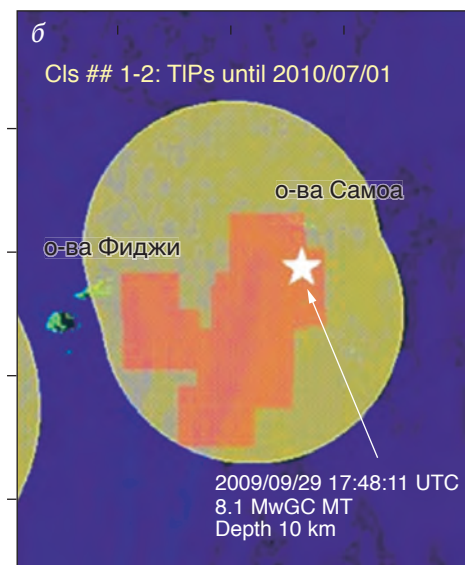


Рис. 3. Система прогноза сильнейших землетрясений мира в реальном времени при помощи алгоритма «M8» (<http://www.mitp.ru>) (a) и объявленная ею тревога в отношении землетрясения 29 сентября 2009 г. в районе островов Самоа ($M = 8.1$) (б)

определен порог $Q = 25\%$, для остальных шести функционалов – $Q = 10\%$. Тревога объявляется в момент времени t_j , когда шесть из семи функционалов демонстрируют аномально большие значения в каждом из двух последовательных трехлетних интервалов времени, и продолжается вперед до

5 лет. Тревога, объявленная с помощью алгоритма «M8», в некоторой круговой области может быть уточнена по пространству с помощью алгоритма «MSc». Иллюстрация работы алгоритма приведена на рис. 3. Оценка эффективности алгоритмов «M8» и «M8-MSc» при прогнозе землетрясений $M \geq 8.0$ представлена в табл. 1.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫБОРОВ В США

С точки зрения прогноза каждое выборное мероприятие, как и землетрясение, можно рассматривать как экстремальное событие в социально-экономической системе со спецификой

соответствующих предвестников. В данной задаче цель прогноза формулируется как смена на выборах США «действующей» политической партии, то есть партии, занимающей до выборов оспариваемое место. Соответственно, проблема прогнозирования формулируется так: «сохранит ли действующая партия это место или уступит его противоборствующей партии», а не «победит ли республиканец или демократ». Как будет показано ниже, эта формулировка имеет решающее значение для прогнозирования результатов рассматриваемых выборов.

Периодичность проведения выборов формально определяется следующим образом.

1. Национальные выборы проводятся каждый четный год, в первый вторник после первого понедельника ноября (т. е. со 2 по 8 ноября включительно).

2. Президентские выборы проводятся один раз в 4 года, то есть через каждый второй день национальных выборов. В каждом из 50 штатов и округе Колумбия люди голосуют отдельно за «выборщиков», присягнувших тому или иному кандидату в президенты. Эти выборщики составляют «Коллегию выборщиков», которая напрямую избирает президента. С 1860 г., когда в основном утвердилась нынешняя двухпартийная система в США, Коллегия выборщиков отменяла решение всенародного голосования только четыре раза: в 1888, 1912, 2000 и 2016 гг. Алгоритмическое прогнозирование таких изменений до сих пор не разработано.

3. Треть сенаторов избираются на шестилетний срок в каждый день выборов. Здесь рассматриваются только «промежуточные» выборы, проводимые в середине президентского срока.

Предвыборная ситуация описывается робастными признаками, определяемыми как ответы «да» или «нет» на анкеты

по президентским выборам (13 вопросов) и промежуточным выборам сенаторов (8 вопросов) [Lichtman et al., 1989, 1996]. Вопросы сформулированы таким образом, что ответ «нет» благоприятствует победе противоборствующей стороны. В число вопросов, например, входят: «Не было ли серьезной конкуренции при определении кандидата от правящей партии?», «Является ли кандидат от правящей партии действующим президентом?», «Находится ли экономика в состоянии рецессии во время выборной кампании?», «Была ли вовлечена правящая администрация в значительный скандал?» и др. Таким образом, исходный массив данных представляет собой двоичную выборку. Согласно алгоритму, путем анализа расстояния Хэмминга [Гвишиани, Кособоков, 1981] победа противоборствующей стороны достигается в случае, если число ответов «нет» (D) превышает порог D^* .

Алгоритм прогнозирования промежуточных выборов в Сенат был разработан на основе ретроспективного анализа данных по трем выборам 1974, 1978 и 1982 гг. В качестве порога рассматривалось значение $D^* = 5$. Алгоритм применялся заблаговременно к пяти предстоящим выборам в период 1986–2002 гг., причем его настройки оставались неизменными из года в год и от штата к штату. Всего в голосованиях принимали участие 150 мест. Для каждого места был сделан отдельный прогноз, из которых 128 оказались верными, а 22 – ошибочными. Статистическая значимость этого показателя составляет 99.9%. Другими словами, вероятность случайно получить такую оценку составляет меньше 0.1%. Для некоторых выборов полученные прогнозы оказались тривиальными, поскольку они совпали с преобладающими ожиданиями экспертов. Такие исходы выборов отдельно приво-

дятся в Обзоре Конгресса. Однако их исключение из выборки по-прежнему дало значимость 99%.

Алгоритм прогнозирования президентских выборов был разработан путем ретроспективного анализа данных о 31 выборах за период 1860–1980 гг., который охватывал промежутки времени между победами А. Линкольна и Р. Рейгана включительно. Алгоритмом прогнозировалась победа соперника действующего президента, если количество ответов «нет» на анкету было не менее 6. Алгоритм применялся для прогнозирования семи будущих выборов с 1984 по 2008 гг. Как и в предыдущем случае, никакие изменения в зависимости от года и штата в алгоритм не вносились. В результате работы алгоритма все прогнозы сбылись (см. табл. 2). В 2000 г. решение народного большинства было отменено Коллегией выборщиков, однако такие сценарии не являлись целью алгоритма.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ РЕЦЕССИЙ

При анализе пяти рецессий в США с 1960 по 1996 гг. было установлено, что каждой из них предшествовал характерный паттерн поведения шести экономических индексов. Этот паттерн наблюдался в интервале от 6 до 14 месяцев перед каждой рецессией и ни в какое другое время. Также было обнаружено, что другой устойчивый паттерн поведения тех же шести макроэкономических показателей возникал в течение 6 месяцев до окончания этих рецессий и ни в какое другое время в течение рецессий. Путем сравнения этих паттернов было установлено, что предшествующие рецессии тренды «финансовых» показателей (из числа анализируемых индексов) противоположны в начале рецессии и при ее завершении. Напротив, предшествующие рецессии тенденции «экономических»

Таблица 2

Прогноз президентских выборов в США до 2008 г.: годы, когда действующий президент победил, показаны курсивом; годы, когда победил соперник, выделены жирным шрифтом

Количество ответов «нет» в пользу соперничающей партии									
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Прогнозы, опубликованные за несколько месяцев									
					<i>2000*</i>				
		<i>1984</i>	<i>1988</i>	<i>2004</i>	<i>1996</i>	1992		2008	
Ретроспективный анализ									
			<i>1964</i>					1980	
			<i>1928</i>					1976	
			<i>1916</i>					1968	
			<i>1908</i>					1952	
		<i>1944</i>	<i>1900</i>	<i>1972</i>				1932	
	<i>1956</i>	<i>1940</i>	<i>1872</i>	<i>1924</i>	<i>1948</i>	1912	1884	1920	1960
<i>1904</i>	<i>1936</i>	<i>1868</i>	<i>1864</i>	<i>1880</i>	<i>1888*</i>	1892	1860	1896	1876*

* годы, когда всенародное голосование было отменено голосованием выборщиков

показателей (из числа анализируемых индексов) имеют один и тот же тренд (возрастающий или убывающий), но в период восстановления становятся более крутыми (рис. 4). Все это предполагает существование гипотетического алгоритма прогнозирования, упрощенная схема которого приведена на рис. 5.

Исходные данные для построения прогнозов включали следующие ежемесячные основополагающие экономические индексы США, которые открыто доступны в базе данных CITIBASE:

1. G10FF: Разница между доходностью 10-летних долгосрочных казначейских облигаций США и процентной ставкой по краткосрочным кредитам на годовой основе (рис. 6).

2. IP: Промышленное производство в целом. Это индекс реального (в постоянных долларах) выхода всей экономики.

3. LHELL: Индекс рекламы работодателей. Он компилируется частной издательской компанией, которая измеряет количество рекламных объявлений о работе (в колонках-дюймах) в определенном числе главных газет.

4. LUINC: Среднее недельное число людей, обращающихся за страхованием по безработице.

5. INVMTQ: Общие материальные запасы в промышленности и торговле в реальных долларах. Включает промежуточные запасы (например, удерживаемые производителями, готовые к отправке торговцам) и конечные запасы вещей (вещи на полках магазинов).

6. FYGM3: Доходность на годовой основе 90-дневных краткосрочных казначейских векселей США в %.

Обучение проводилось на временных рядах, представляющих собой ежемесячные значения экономических индексов, про которые было известно, что они связаны с приближением рецессии.

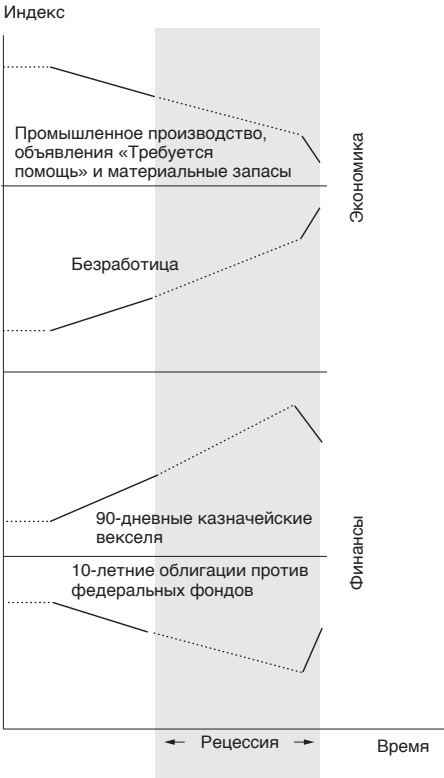


Рис. 4. Изменения рассматриваемых показателей, предшествующие началу и завершению рецессии (сплошная линия)

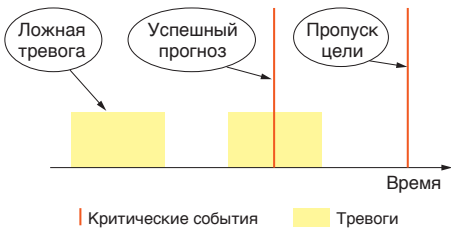


Рис. 5. Возможные сценарии прогноза экстремальных событий гипотетическим алгоритмом в приложении к социоэкономическим системам

Локальное линейное приближение индекса $f(t)$ (t – номер месяца) осуществлялось методом наименьших квадратов внутри скользящего окна. Далее

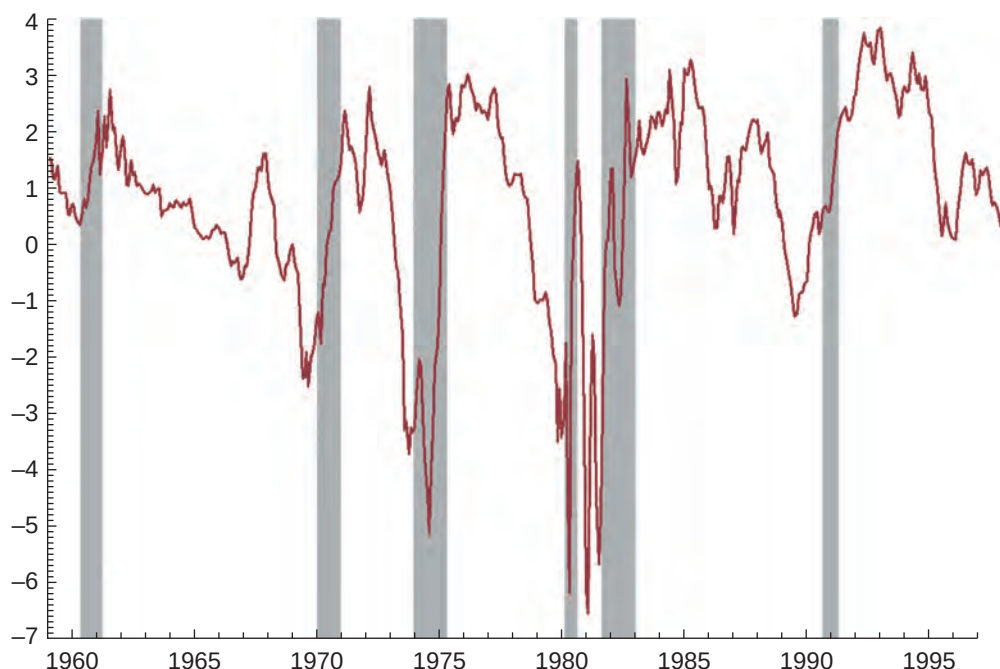


Рис. 6. Поведение индекса G10FF: серыми полосами отмечены рецессии

производилась оценка двух функционалов, отражающих: степень роста $K^f(m/s)$ на интервале s , согласно коэффициентам линейной регрессии, и отклонение от долгосрочного тренда $R^f(m)$, соизмеримого с давностью предыдущей рецессии. Упрощенное количественное определение предвестникового поведения индексов и функционалов осуществлялось следующим образом. Их значения рассматривались на наиминимум, бинарном уровне разрешения, т. е. разделялись только значения выше и ниже порога T . Таким образом, все месяцы (объекты распознавания) описывались бинарными векторами, длина которых соответствует числу экономических индексов. Такая дискретизация обеспечивает робастность при анализе. Порог определялся по значению параметра Q из условия, что индекс или функционал превосходит $T^f(Q)$ в течение $Q\%$ рассматриваемых месяцев. В итоге были вы-

делены следующие предвестники начала рецессии:

- 1) малое значение G10FF ($Q = 90\%$);
- 2) малое значение $R^{IP}(m)$ ($Q = 75\%$);
- 3) малое значение $K^{LHELL}(m/5)$ ($Q = 67\%$);
- 4) большое значение $K^{LUINC}(m/10)$ ($Q = 17\%$);
- 5) малое значение $R^{INVTQ}(m)$ ($Q = 25\%$);
- 6) большое значение $R^{FYGM^3}(m)$ ($Q = 25\%$).

Согласно алгоритму прогноза начала рецессии, тревога объявляется на три месяца после каждого месяца, для которого $D \geq 4$, где D – число предвестников.

Аналогичным образом были определены предвестники конца рецессии. Согласно алгоритму прогноза конца рецессии тревога объявляется на три месяца после трех месяцев подряд, для которых $D \geq 3$. Иллюстрация работы алгоритмов показаны на рис. 7–8.

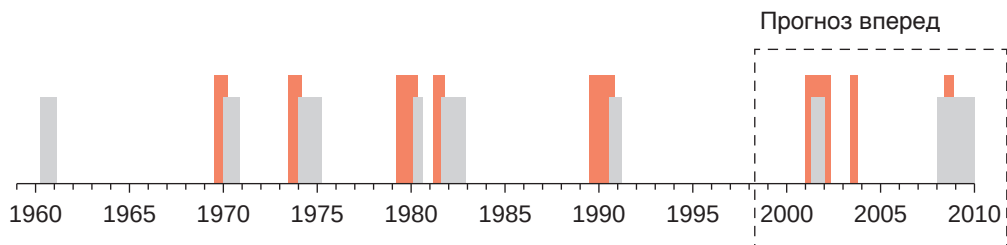


Рис. 7. Прогноз начала рецессий: серыми полосами отмечены рецессии, красными – тревоги, полученные с помощью алгоритма по данным за 1960–1996 гг.

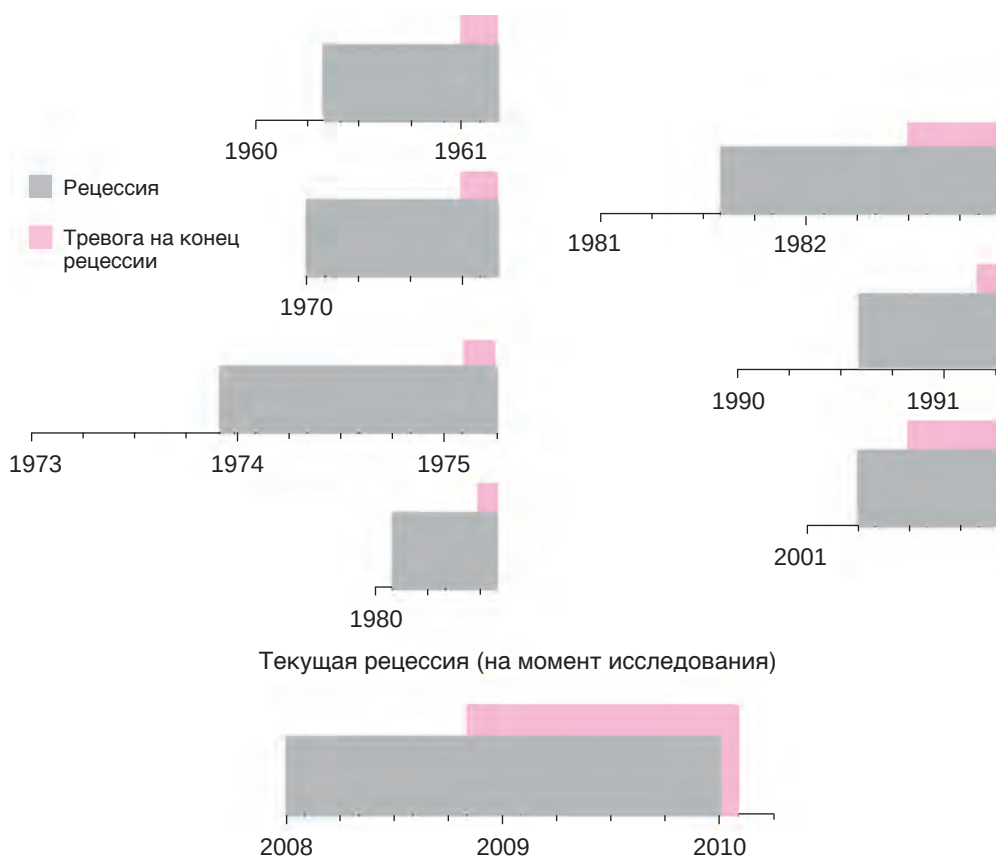


Рис. 8. Прогноз конца рецессий по данным за 1960–1996 гг.: серыми полосами отмечены рецессии, красными – тревоги, полученные с помощью алгоритма

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РОСТА БЕЗРАБОТИЦЫ

Другое направление в области прогноза было связано с рассмотрением специфического явления в динамике безработицы – эпизодов резкого подъема уровня безработицы, получивших название «быстрое ускорение безработицы» (Fast Acceleration of Unemployment). Исследование представляло собой так называемый «технический» анализ, заключающийся в эвристическом поиске явлений, предшествующих такому подъему безработицы (ПБ). Как и прежде, была использована методология распознавания образов нечастых событий. Она была разработана школой искусственного интеллекта И.М. Гельфанда для исследования редких явлений весьма сложного происхождения, которые по своей природе ограничивают возможности использования классических статистических или эконометрических методов. Цель заключалась в том, чтобы с помощью анализа макроэкономических показателей сформировать робастный и жестко определенный алгоритм прогнозирования типа «да или нет», указывающий в любой момент времени, следует ли ожидать ПБ или нет в течение последующих T месяцев. При анализе динамики безработицы во Франции в период с 1962 по 1997 г. был обнаружен особый «предупреждающий» паттерн поведения трех макроэкономических показателей, который лег в основу алгоритмического прогнозирования ПБ. Этот паттерн в течение 12 месяцев предшествовал шести из семи ПБ, выявленных в указанный период. При этом он не проявлялся ни в какое другое время. Последующее применение алгоритма прогноза в Германии, Италии и США дало аналогичные результаты. Такая прогнозируемость под-

тверждает тот факт, что в экономике, как и многих других сложных динамических системах, возможно периодическое возникновение устойчивых паттернов коллективного поведения.

Для определения ПБ, который является объектом прогноза, был введен индикатор подъема безработицы $F(m)$. Он вычисляется при помощи сглаживания сезонных вариаций ежемесячного числа безработных с последующей оценкой изменчивости коэффициентов линейной регрессии, вычисленных внутри скользящего окна. Начало периода ПБ определяется по локальному максимуму $F(m)$, превосходящему некоторый порог F . Время m^* и значение $F^* = F(m^*)$ такого максимума являются, соответственно, временем начала и величиной ПБ. Период ПБ заканчивается в месяце m_e , когда $F(m)$ имеет ближайший следующий локальный минимум (рис. 9).

Для выделения предвестников ПБ использовались экономические показатели Франции, схожие с теми, которые анализировались в задаче прогноза экономических рецессий в США. «Предупреждающие» тренды показателей, характерные для приближающегося ПБ, аппроксимировались коэффициентами линейной регрессии $K^f(m/s)$, где f – анализируемый показатель, s – окно обзора в месяцах. Дискретизация полученных значений выполнялась путем их преобразования в бинарный вектор полностью по аналогии с алгоритмом прогноза экономических рецессий (см. выше). В итоге были получены следующие предвестники ПБ.

1. Индекс промышленного производства, составленный из взвешенных уровней производства в многочисленных секторах экономики, в % к индексу 1990 г. (IP): большое значение $K^{IP}(m/12)$ ($Q = 50\%$).

2. Долговременная доходность по десятилетним государственным обли-

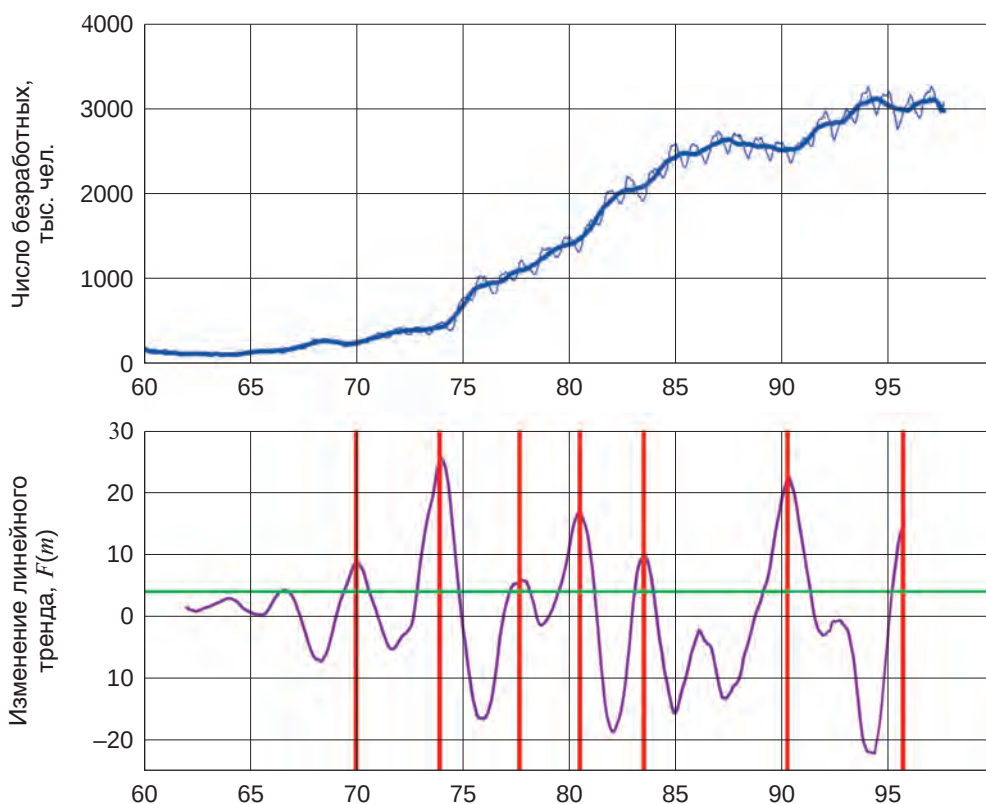


Рис. 9. Ежемесячная безработица во Франции в тыс. чел. (вверху): тонкая кривая – исходная информация $u(t)$ из базы данных OECD, толстая кривая – сглаженные данные $U(t)$. Определение ПБ (внизу): $F(m)$ показывает изменение линейного тренда $U(t)$, начало ПБ соответствует локальному максимуму $F(m)$, превосходящему порог $F = 4.0$ (зеленая горизонтальная линия), красные вертикальные линии обозначают начальные моменты периодов ПБ. По оси абсцисс указаны годы

гациям в % (L): большое значение $K^L(m/12)$ ($Q = 33\%$).

3. Кратковременная доходность по трехмесячным векселям в % (S): большое значение $K^S(m/12)$ ($Q = 25\%$).

Согласно алгоритму прогноза, тревога объявляется на 6 месяцев после каждого месяца, для которого $D = 3$, где D – число предвестников. Пример работы алгоритма ретроспективного прогноза приведен на рис. 10.

Аналогичный ретроспективный прогноз был построен для Германии, Италии и США. Остановимся более

подробно на результатах для США. На рис. 11 показан график процента безработных в США. По экономическим индикаторам, которые использовались в прогнозе экономических рецессий в США, были определены эквиваленты предвестников ПБ:

1) большое значение $K^{IP}(m/12)$ ($Q = 50\%$);

2) большое значение $K^{FYGT10}(m/12)$ ($Q = 33\%$) (FYGT10 – доходность на годовой основе 10-летних долгосрочных казначейских облигаций США в %);

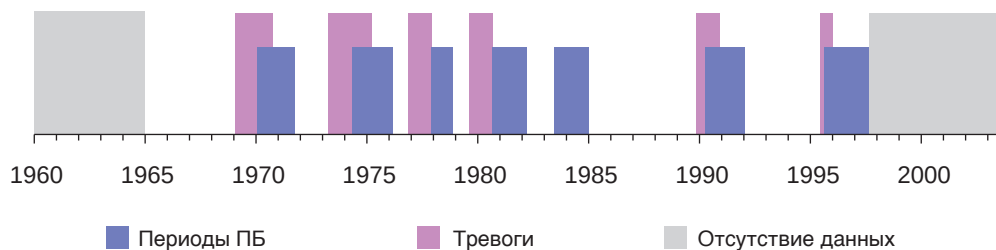


Рис. 10. Результат применения гипотетического алгоритма ретроспективного прогноза ПБ во Франции

3) большое значение $K^{FYGM3}(m/12)$ ($Q = 25\%$).

Результаты ретроспективного применения алгоритма приведены на рис. 12.

Финальной проверкой эффективности любого прогнозного исследования является способность прогнозирования в будущее. Такие прогнозы,

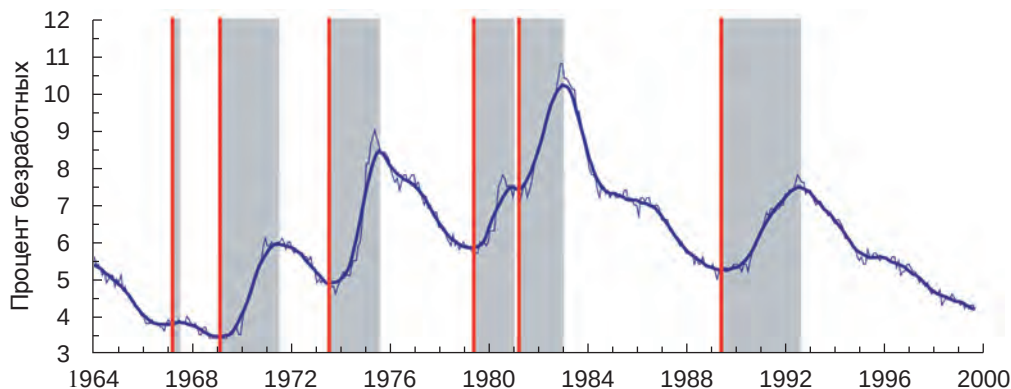


Рис. 11. Динамика безработицы в США: исходные данные обозначены тонкой линией, данные после сглаживания – толстой линией. Красные вертикальные линии обозначают месяцы, когда начинается ПБ (локальные минимумы сглаженного процента безработных), серые полосы – периоды ПБ

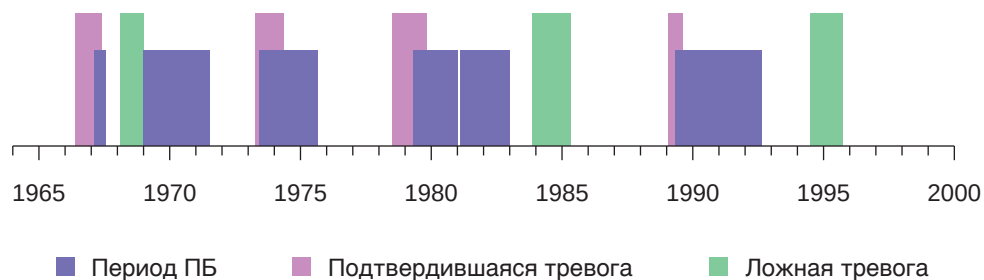


Рис. 12. Результаты ретроспективного прогноза ПБ в США



Рис. 13. Прогноз ПБ в США вперед на 2000–2010 гг., сделанный в сентябре 1999 г.: красные вертикальные линии обозначают начало ПБ, серые полосы – периоды ПБ, розовые прямоугольники – тревоги, полученные с помощью алгоритма

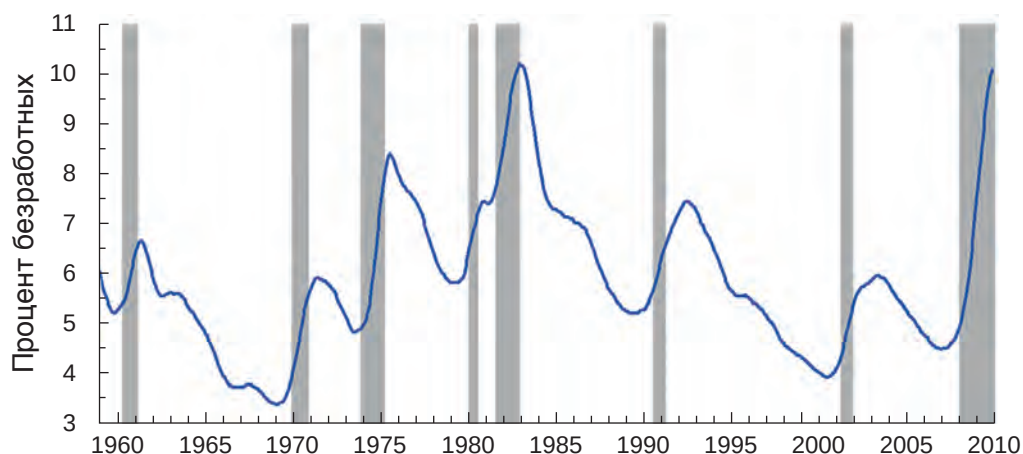


Рис. 14. Безработица и рецессии в США: процент безработных после сглаживания помечен синей кривой, периоды рецессий – серыми полосами

выполненные для США, оказались успешными. На рис. 13 приведен результат прогноза ПБ на 2000–2010 гг., полученный в сентябре 1999 г. Сравнение периодов роста безработицы и экономических рецессий в США представлено на рис. 14. Из рисунка видно, что все восемь рецессий за пе-

риод 1960–2010 гг. имели место во время восьми наиболее продолжительных периодов ПБ. При этом только три из семи тревог, предвещающих рецессии (см. рис. 7), начались перед соответствующими локальными минимумами процента безработных (см. рис. 14). Примечательно, что при определении

этих тревог среди прочих индикаторов использовался и уровень безработицы, только измеренный иным образом (показатель LUINC). Это обстоятельство подтверждает, что прогноз безработицы не эквивалентен прогнозу рецессий.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОДЪЕМА ЧИСЛА УБИЙСТВ В МЕГАПОЛИСАХ

Динамика преступности является важной характеристикой устойчивости общества и риска ее дестабилизации, служащей, в свою очередь, прелюдией к катастрофе. Для прогноза рассматривалась такая важная характеристика динамики преступности, как всплеск убийств в мегаполисе. Это исследование объединило профессиональный

опыт сотрудников полиции и ученых, работающих в области распознавания образов редких событий. В задаче анализировалась статистика нескольких видов преступлений в г. Лос-Анджелесе за период 1975–2002 гг. Основное внимание уделялось тому, как изменялись эти статистические данные перед резким и продолжительным ростом («всплеском») числа убийств (рис. 15). Цель заключалась в поиске алгоритма прогнозирования начала подъема (числа) убийств (ПУ) путем мониторинга уровня различных преступлений. Осуществимость этой цели была подкреплена двумя обстоятельствами. Первое связано с тем, что совокупность имеющихся статистических данных о преступности выявила закономерность между всплеском тяжких преступлений и предшествующим ростом менее

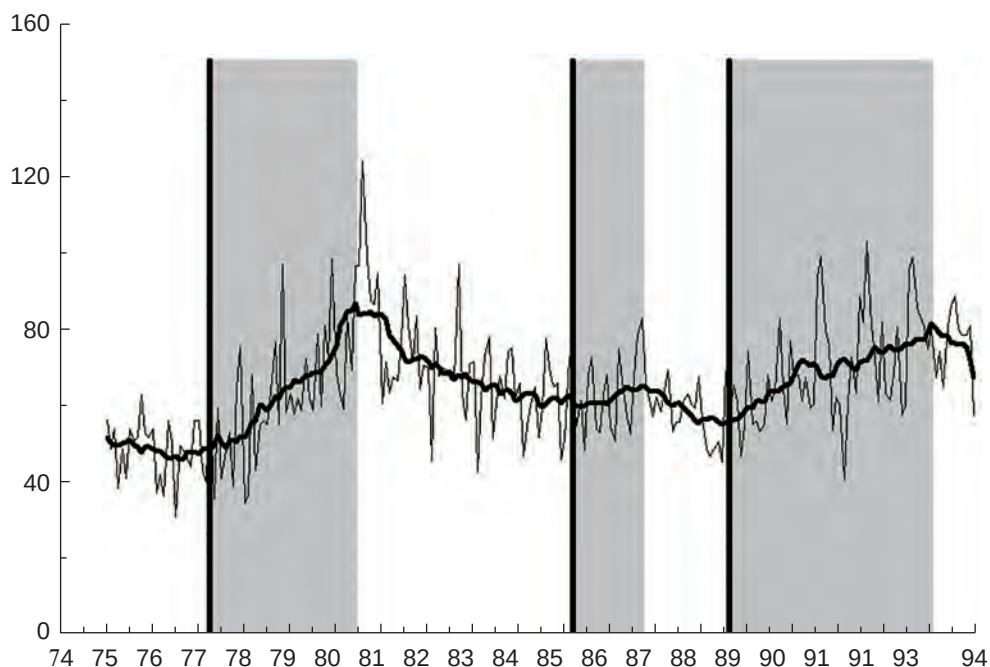


Рис. 15. Ежемесячное число убийств на 3 млн жителей в Лос-Анджелесе за 1975–1993 гг.: исходный временной ряд $H(t)$ показан тонкой кривой, сглаженный ряд $H^*(t)$ – толстой кривой, месяцы начала ПУ – вертикальными линиями, периоды ПУ – серыми полосами

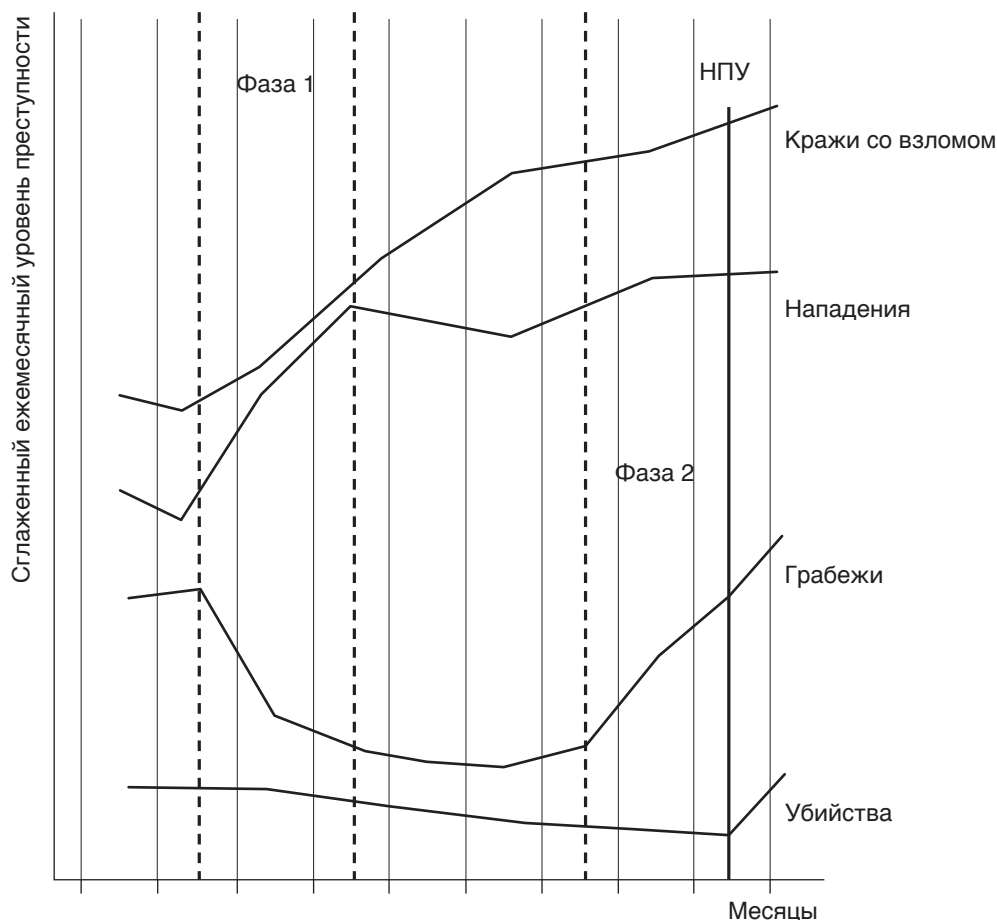


Рис. 16. Схема «предупреждающих» изменений в статистике преступности: начало подъема убийств (НПУ) отмечено вертикальной чертой

тяжких преступлений. Второе обусловлено успехами в области прогноза критических явлений в различных сложных нелинейных системах, относящихся к теоретической физике, наукам о Земле, социальным наукам и др.

В качестве исходных данных рассматривалась обширная информация о статистике грабежей, нападений, краж со взломом и самих убийств, доступная в Национальном архиве криминальной юстиции. В ходе исследований было показано, что эпизоды роста краж со взломом и нападений

происходят одновременно за 4–11 месяцев до всплеска числа убийств, в то время как количество грабежей снижается. Позже, ближе к началу ПУ, грабежи начинают расти (рис. 16). Этим изменениям были даны однозначные количественные определения. Они использовались для формулирования гипотетического алгоритма прогноза ПУ. В ходе ретроспективного анализа было установлено, что такой алгоритм одинаково эффективен на протяжении всех рассматриваемых лет, несмотря на существенные изменения

как социально-экономической обстановки, так и количества преступлений. Он дал удовлетворительные результаты в прогнозе ПУ не только в Лос-Анджелесе, но и в Нью-Йорке. Тесты на чувствительность показали, что прогнозы устойчивы к изменениям настраиваемых параметров алгоритма. Существование «универсального» сценария эскалации преступности, независимого от конкретных причин, вызывающих каждый всплеск, накладывает эвристические ограничения при моделировании динамики преступности и указывает на перспективность дальнейших исследований в этом направлении.

Алгоритм прогнозирования начала подъема убийств (НПУ) сводится к распознаванию «предупреждающих» закономерностей, формирующихся во множестве наблюдаемых индикаторов при приближении НПУ. Вероятностная составляющая такого прогноза представлена оценками вероятностей ошибок – ложных тревог и пропусков цели. Эта вероятностная составляющая неизбежна, поскольку рассматривается очень сложный нестационарный процесс с использованием неточной статистики преступности. Более того, прогнозируемость поведения хаотической системы в принципе ограничена.

По аналогии с подходом, описанным ранее, были выделены следующие предвестники ПУ:

1. Все грабежи (Rob): малое значение $K^{\text{Rob}}(m/12)$ ($Q = 66.7\%$).

2. Грабежи с огнестрельным оружием (FRob): малое значение $K^{\text{FRob}}(m/12)$ ($Q = 66.7\%$).

3. Грабежи с ножом или режущим инструментом (KCIR): малое значение $K^{\text{KCIR}}(m/12)$ ($Q = 50\%$).

4. Грабежи с другим опасным оружием (ODWR): малое значение $K^{\text{ODWR}}(m/12)$ ($Q = 87.5\%$).

5. Нападения с огнестрельным оружием (FA): большое значение $K^{\text{FA}}(m/12)$ ($Q = 50\%$).

6. Нападения с ножом или режущим инструментом (KCIA): большое значение $K^{\text{KCIA}}(m/12)$ ($Q = 50\%$).

7. Незаконное проникновение без применения силы (UNFE): большое значение $K^{\text{UNFE}}(m/12)$ ($Q = 50\%$).

Согласно гипотетическому алгоритму прогноза, тревога объявляется на 9 месяцев после двух месяцев подряд, для которых число предвестников не меньше 6. На рис. 17 приведены результаты прогноза НПУ в Лос-Анджелесе за период 1975–1993 гг. В данном случае алгоритмом использовались данные Национального архива криминальной юстиции и указанные выше предвестники. Далее алгоритм тестировался на данных за пределами исходной выборки, т.е. на тех, которые не использовались при его разработке. Такой тест был возможен, поскольку алгоритм является самонастраивающимся – пороговые значения для формирования бинарных векторов не фиксированы, а определяются автоматически по статистике преступности как перцентиль уровня Q (см. описание выше). За период времени с января 1990 по май 2002 г. использовались данные Отдела информационных технологий полиции Лос-Анджелеса. Сравнение результатов за пересекающиеся три года (1990–1992 гг.) показало, что они достаточно близки, особенно после сглаживания. Результат прогноза на период 1994–2002 гг. представлен в правой части рис. 17.

Из двух эпизодов НПУ за период 1994–2001 гг. первый был зафиксирован тревогой, которая началась в месяц НПУ. Второй эпизод был пропущен, поскольку тревога была объявлена только через два месяца после его начала. Несмотря на эту ошибку, прогноз все равно можно считать информативным: за эти два месяца количество убийств

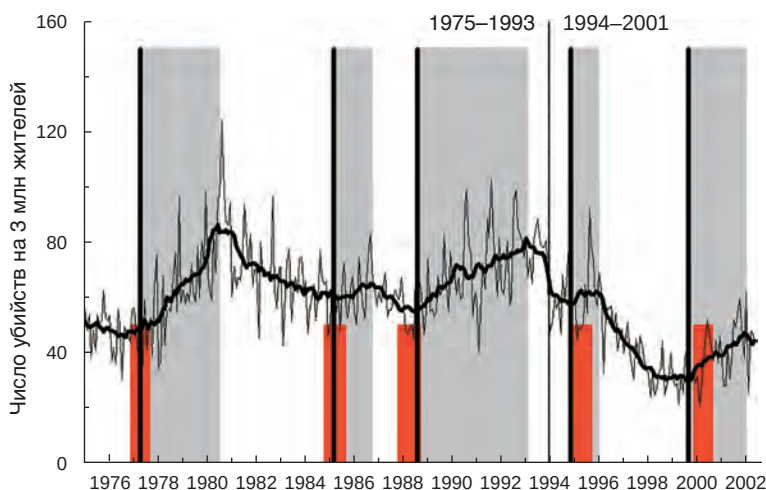


Рис. 17. Эффективность алгоритма прогноза ПУ в Лос-Анджелесе за 1975–2002 гг.: месяцы НПУ (цель прогноза) показаны вертикальными линиями, периоды ПУ – серыми полосами, тревоги, полученные с помощью алгоритма, – красными полосами. Для разработки алгоритма были использованы данные Национального архива криминальной юстиции за 1975–1993 гг. Далее он был применен к данным Отдела информационных технологий полиции Лос-Анджелеса за последующие 9 лет

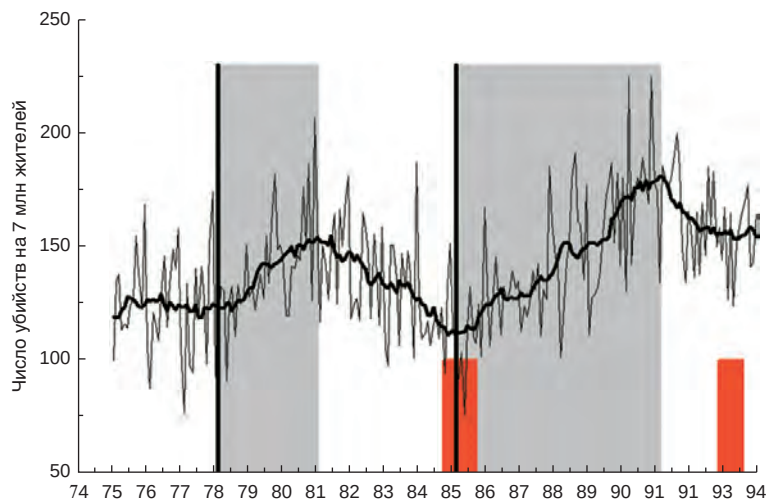


Рис. 18. Результат прогноза НПУ в Нью-Йорке за период 1975–1993 гг. по данным Национального архива криминальной юстиции. Обозначения аналогичны рис. 17

выросло всего на несколько процентов, что не свидетельствует о начале продолжительного всплеска убийств. Результат применения алгоритма в отношении преступности Нью-Йорка пред-

ставлен на рис. 18. В данном случае использовались данные Национального архива криминальной юстиции, как и в случае Лос-Анджелеса за 1975–1993 гг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование экстраординарных явлений типа «да или нет» отличается от традиционных прогнозов, представляющих собой экстраполяцию процесса во времени, которые в большей степени опираются на классическую теорию. Несомненно, описанные алгоритмы прогнозирования все еще нуждаются в улучшении, однако уже можно сформулировать несколько важных обнадеживающих выводов.

1. В каждом описанном случае правила прогнозирования едины, невзирая на огромную сложность рассматриваемых процессов, разнообразие целей прогнозирования и изменение конъюнктуры во времени. В отношении землетрясений характер предвестников сейсмичности для микротрещин в лабораторных образцах оказался аналогичен крупнейшим землетрясениям мира, что охватывает широкий диапазон энергий от 10^{-1} эрг до 10^{26} эрг. Что касается рецессий и роста безработицы, сходство между предвестниками сохраняется во времени, невзирая на существенные изменения в экономике, произошедшие с 1962 г. Для роста безработицы их сходство также не зависит от различий между странами.

2. Все алгоритмы прогноза основываются на широко доступных данных глобальных каталогов землетрясений, основных макроэкономических показателей и т. п.

3. В каждом случае прогнозируемость достигается за счет чрезвычайно робастного анализа. Здесь уместно процитировать Джеймса Гарольда Стока, экономиста с отличным опытом прогнозирования рецессий, который описал свои впечатления от такой надежности: «Прогнозирование рецессий

требует подгонки нелинейных, многомерных моделей к пригоршне наблюдений, порожденных, возможно, нестационарной экономической средой. Представленные здесь доказательства свидетельствуют о том, что эти простые бинарные преобразования экономических показателей имеют значительную прогностическую ценность, сравнимую или, во многих случаях, лучшую, чем у более традиционных моделей».

Точность прогноза по-прежнему остается ограниченной. Тем не менее обнадеживающим для дальнейших исследований является богатство еще неиспользованных возможностей, соответствующих моделей и имеющихся данных.

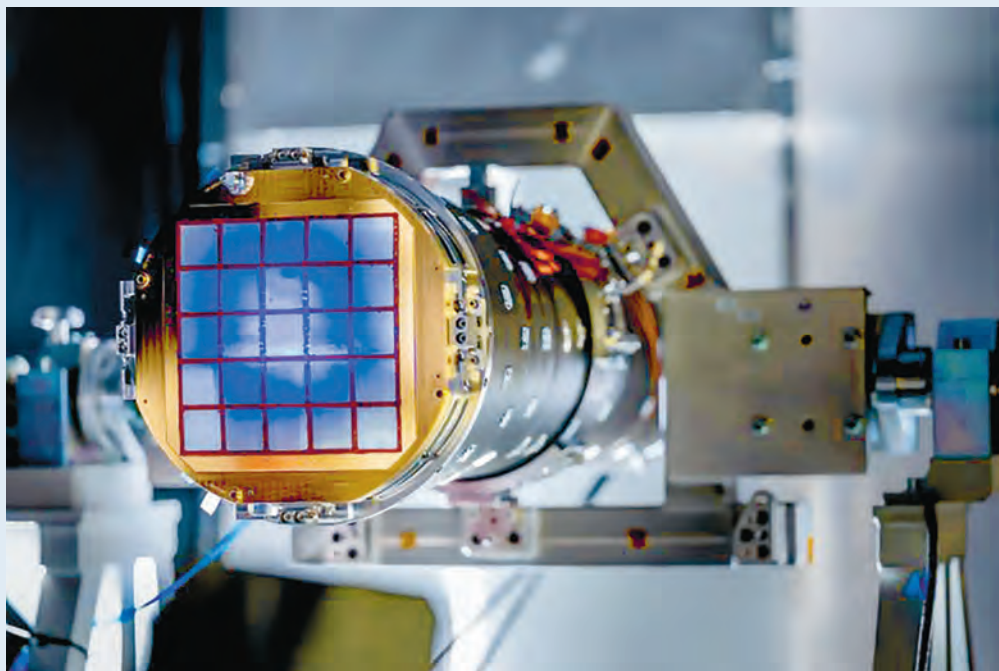
Статья подготовлена по материалам книги «Prediction of Extreme Events in Nature and Society» (V.I. Keilis-Borok. Ed.: A.A. Soloviev. Ori Books. USA. 2018. ISBN: 978-1-940076-44-7. <https://doi.org/10.28935/9781940076447>) и научного доклада чл.-корр. РАН Александра Анатольевича Соловьёва на заседании Президиума Российской академии наук 29 декабря 2009 г.

Литература

1. Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Ranzman I. Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M. Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1976. V. 11. Is. 3. P. 227–283.
2. Lichtman A.J., Keilis-Borok V.I. Aggregate-level analysis and prediction of midterm senatorial elections in the United States, 1974–1986. *Proc Natl Acad Sci USA*. 1989. V. 11. Is. 24. P. 10176–10180.
3. Lichtman A.J. *The Keys to the White House*. Lanham: Madison Books, 1996.
4. Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г. К обоснованию результатов прогноза мест сильных землетрясений, полученных методами распознавания // *Известия АН СССР. Физика Земли*. 1981. № 2. С. 21–36.

КИТАЙ И ФРАНЦИЯ ЗАПУСТИЛИ ОБСЕРВАТОРИЮ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ГАММА-ВСПЛЕСКАМИ

DOI: 10.7868/50044394824030083



Инструмент MXT, установленный на SVOM. Источник: © CNES/DE PRADA Thierry, 2021

22 июня с космодрома Сичан на западе Китая стартовала ракета «Чанчжэн-2С». Она вывела на низкую околоземную орбиту китайско-французскую астрономическую обсерваторию SVOM, а также попутный китайский микроспутник CATCH-1. Аббревиатура расшифровывается как Космический многодиапазонный астрономический монитор переменных объектов (Space-based multi-band astronomical Variable Objects Monitor).

Это совместный проект Китайской национальной космической администрации (CNSA) и Национального центра космических исследований Франции (CNES), над которым на протяжении более 20 лет работали около 60 китайских и 40 французских ученых.

SVOM дополнит, а потом, вероятно, станет «идейным преемником» космического телескопа Swift (NASA), который был запущен уже более 20 лет назад также для изучения гамма-всплесков.

SVOM – космический аппарат массой 930 кг, из которых почти половина (450 кг) приходится на научную аппаратуру. Впервые на одном аппарате собраны приборы для изучения гамма-всплесков одновременно в рентгеновском, гамма- и видимом диапазонах.

SVOM будет искать гамма-всплески и другие события с большим энергосодержанием, определять их координаты и передавать другим обсерваториям. Среди научных задач проекта – изучение темной энергии и эволюции Вселенной, а также наблюдение за электромагнитными сигналами, связанными с гравитационными волнами.

Руководитель проекта с китайской стороны Вэй Цзяньнянь считает, что SVOM поможет решить многие фундаментальные вопросы эволюции Вселенной. «Мы ждем некоторых важных открытий. С помощью SVOM мы сможем обнаружить самые ранние гамма-всплески, которые произошли, когда Вселенная была еще в “младенческом возрасте”. Мы также надеемся обнаружить особые и редкие гамма-всплески и даже подобные всплески новых типов. Например, наш спутник подходит для поиска ярких вспышек электромагнитного излучения, которые возникают при столкновении и слиянии двух нейтронных звезд», – говорит Вэй Цзяньнянь.

В составе SVOM два французских и два китайских научных инструмента:

1. Телескоп ECLAIRs для обнаружения и локализации гамма-всплесков в рентгеновском и низкоэнергетическом гамма-диапазоне (от 4 до 250 кэВ).

2. Микроканальный рентгеновский телескоп MXT (Microchannel X-ray Telescope) предназначен для наблюдения послесвечения гамма-всплесков

в мягком рентгеновском диапазоне (от 0.2 до 10 кэВ).

3. В задачи монитора гамма-всплесков GRM (Gamma Ray Burst Monitor) входит оперативное обнаружение и измерение спектра высокоэнергетических событий (от 15 до 5000 кэВ).

4. Телескоп VT (Visible Telescope) нацелен на наблюдение в видимом диапазоне послесвечения гамма-всплесков.

Также в проект SVOM входит комплекс наземной аппаратуры: набор широкоугольных камер GWAC (Ground-based Wide Angle Camera) для регистрации оптического излучения, установленный в обсерватории Синлун в КНР, и два комплекта телескопов последующего наблюдения гамма-всплесков GFT (Ground Follow-up Telescope) для точного измерения их координат.

Гамма-всплески впервые обнаружили в 60-е гг. XX в. с помощью спутников *Vela*, предназначенных для поиска следов ядерных взрывов. Затем на протяжении почти тридцати лет астрофизики пытались понять природу этих загадочных явлений.

Сегодня предполагается, что гамма-всплески в зависимости от типа рождаются в ходе коллапса массивных звезд либо в результате слияния нейтронных звезд или нейтронных звезд и черных дыр. Зарегистрировано несколько очень далеких подобных событий, отстоящих от нас на расстоянии около 13 млрд световых лет. Иными словами, они произошли в очень молодой Вселенной, что, в свою очередь, позволяет понять, как она была устроена в это время. Поэтому поиски гамма-всплесков весьма важны не только для изучения эволюции звезд, но и для понимания истории Вселенной.

*Caïm npoeKMa SVOM <https://www.svom.eu/en/home/>
China, France launch satellite to better understand the universe
<https://phys.org/news/2024-06-china-france-satellite-universe.html>
Abdo A.A. et al. Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from
GRB080916C. *Science*. Vol. 323, Issue 5922, pp. 1688–1693 (2009)
<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1169101>
26.06.2024 Kумайско-французская обсерватория SVOM
<https://novosti-kosmonavtiki.ru/articles/204842/>*

BERICOLOMBO ВО ВРЕМЯ ЧЕТВЕРТОГО ГРАВИТАЦИОННОГО МАНЕВРА СФОТОГРАФИРОВАЛ МЕРКУРИЙ НА БЛИЗКОМ РАССТОЯНИИ

DOI: 10.7868/50044394824030095



Снимок кратера Вивальди, сделанный *BepiColombo* 4 сентября 2024 года на расстоянии 355 км от поверхности Меркурия. Источник: ESA/*BepiColombo*/MTM

4 сентября 2024 г. космический аппарат *BepiColombo* – совместный проект Европейского космического агентства (ESA) и Японского аэрокосмического агентства (JAXA) во время своего четвертого гравитационного маневра у Меркурия приблизился к планете на расстояние всего около 165 км от поверхности (до этого самый близкий пролет над Меркурием совершил аппарат MESSENGER в 2008 г. – тогда снимки были сделаны с высоты 199 км). Во время пролета включались некоторые научные приборы и работали камеры, которые прислали на Землю новые снимки планеты. Впервые удалось сфотографировать южный полюс Меркурия.

BepiColombo находится на пути к Меркурию уже семь лет. Достигнуть орбиты планеты непросто. Чтобы замедлить скорость, аппарату необходимо совершить девять гравитационных маневров. Семь из них уже прошли успешно (один – у Земли, два у Венеры, четыре у Меркурия). Осталось совершить еще два. Как недавно сообщило ESA, прибытие миссии к Меркурию ожидается в конце 2026 года – на 11 месяцев позже запланированного срока. Задержка связана с неполадками в двигателях перелетного модуля MTM, которые произошли в апреле 2024 г. Поскольку тягу двигателям удалось вернуть лишь частично, инженерам

и баллистикам пришлось изменить траекторию полета, пересмотреть сроки гравитационных маневров и отложить срок прибытия миссии к Меркурию. Именно по этой причине во время четвертого гравитационного маневра *BepiColombo* пришлось приблизиться к Меркурию на 35 км ближе, чем планировалось.

«То, как прошел маневр – большой успех. Сейчас *BepiColombo* находится там, где он и должен быть, все происходит так, как мы и планировали. Но огромная удача состоит еще и в том, что у нас появилась возможность получить уникальные снимки в таких местах и ракурсах, которые аппарат уже не сможет сделать, когда выйдет на конечную орбиту», – говорит Джек Райт (Jack Wright), научный сотрудник группы по анализу снимков *BepiColombo* Европейского астрономического центра (ЕАС).

В объективы камер *BepiColombo* попали несколько кратеров, например, кратер Антонио Вивальди (названный в честь итальянского композитора) и кратер Стоддарт, получивший свое имя совсем недавно в честь новозеландской художницы Маргарет Стоддарт.

Кратер Вивальди диаметром 210 км, который *BepiColombo* сфотографировал в лучах меркурианского заката, давно привлекает внимание планетологов своим строением. Он имеет четкую двухкольцевую структуру, причем между кольцами, которые приподняты над поверхностью, расстояние примерно одинаковое. Особый интерес представляют впадины и поднятия на кольцах, которые напоминают горные хребты. Как они образовались, остается загадкой. Возможно, что после формирования самого кратера в результате падения кометы или метеорита его поверхность была заполнена вулкани-

ческой базальтовой лавой. Лава могла устремиться в кратер, как бы прорезая проходы в кольцах. А возможно, такая «горная система» – это результат «отскока» материала после столкновения метеорита или кометы с поверхностью.

Кратер Стоддарт имеет чуть меньший диаметр – 155 км и похожее строение, но с одним кольцом «горной системы».

Миссия *BepiColombo* стартовала в 2018 г. и стала третьей космической миссией к Меркурию после *Mariner-10* (NASA, 1973) и *MESSENGER* (NASA, 2004).

Миссия *BepiColombo* включает два аппарата – меркурианский планетный орбитальный аппарат (МРО), разработанный в ESA, и меркурианский магнитосферный орбитальный аппарат (ММО), созданный в JAXA. Они соединяются с помощью перелетного модуля МТМ. Когда миссия достигнет устойчивой орбиты вокруг Меркурия, произойдет разделение модулей. МРО, на борту которого находится 11 научных приборов, будет изучать поверхность Меркурия с полярной орбиты с высоты 480–1500 км. В задачи ММО входит исследование магнитосферы Меркурия на полярной орбите с высотой 590–11 640 км.

Среди приборов, которые несет МРО, находится меркурианский гамма- и нейтронный спектрометр (МГНС), разработанный в отделе ядерной планетологии ИКИ РАН. Также с участием ИКИ РАН были изготовлены приборы PHEBUS (ультрафиолетовый спектрометр для исследования состава и динамики экзосферы Меркурия), плазменный комплекс SERENA и камера наблюдений в лучах натрия для определения причин появления этого элемента в экзосфере Меркурия (MSASI), которая размещается на ММО.

www.space.com

05.09.2024 *BepiColombo's best images yet highlight fourth Mercury flyby* https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/BepiColombo_s_best_images_yet_highlight_fourth_Mercury_flyby

02.09.2024 *Fourth Mercury flyby begins BepiColombo's new trajectory* https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo/Fourth_Mercury_flyby_begins_BepiColombo_s_new_trajectory

EARTH & UNIVERSE

3 (357), 2024

May–June

TABLE OF CONTENT:

Lev M. ZELENYI Editorial	3
Olga K. SILCHENKO Galaxies' Evolution: Gifts From The Neighbourhood	6
Olga S. SAZHINA Folds Of Space-Time: History of The Search For Cosmic Strings	16
Alexander S. TSVETKOV From the Earth to the Universe: Measuring Distances Throughout the History	29
History of Science	
Oleg R. KOTSYURBENKO, Anna F. GOVOROVA Philosophy of Cosmism And the Rise of Russian Astrobiology	49
XXI Century Cosmonautics	
Alexander V. IPATOV, Leonid A. VEDESHIN, Sergey A. GERASYUTIN Space Junk Monitors And the Future Of the Near-Earth Space Exploration. Part 2	75
Observatories & Institutes	
Yuri V. SOLOMONOV, Sergey A. GERASYUTIN “The Second Telescope of America”	85
Hypotheses, Ideas, Discussion	
Anatoliy A. SOLOVYEV On Forecast of Natural and Social Extremal Events	99
In Brief	
China And France Launch Observatory to Study Gamma-Ray Bursts	119
BepiColombo Snaps Mercury During Fourth Fly-By	121

Индекс 38808

Земля и Вселенная, 3/2024

Заведующая редакцией А.Ю. Обод

Редакторы С.А. Герасютин, Д.А. Кононов, О.С. Сажина

Корректор С.О. Розанова

Верстка макета Н.В. Мелковой

Просим обращаться

по вопросам публикации материалов:

+7(495) 276-77-35 (доб. 42-31), e-mail: zevs@naukapublishers.ru

по вопросам сотрудничества:

+7(495) 276-77-35 (доб. 43-01 или 43-02),

e-mail: journals@naukapublishers.ru

Журнал зарегистрирован Государственным комитетом

Совета министров СССР по печати 28 июня 1991 г.

Свидетельство о регистрации № 2119

www.naukabooks.ru/zhurnali/katalog/zemlja-i-vselennaja/

Все права защищены.

Перепечатка материалов возможна только с разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с мнением автора.

Все иллюстрации в статьях предоставлены авторами.

*Ответственность за точность и содержание рекламных
материалов несут рекламодатели*

12+

Сдано в набор 10.06.2024 Подписано к печати 11.11.2024

Дата выхода в свет 29.11.2024 Формат 70 × 100¹/₁₆

Цифровая печать Усл.печ.л. 10,07 Уч.-изд.л. 10,07 Бум.л. 3.875

Тираж 174 экз. Заказ № 192 Цена свободная

Учредители: РАН, ФГБУ «Издательство «Наука»

Редакция и издатель: ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

Отпечатано в типографии ФГБУ «Издательство «Наука»

Адрес: 121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1



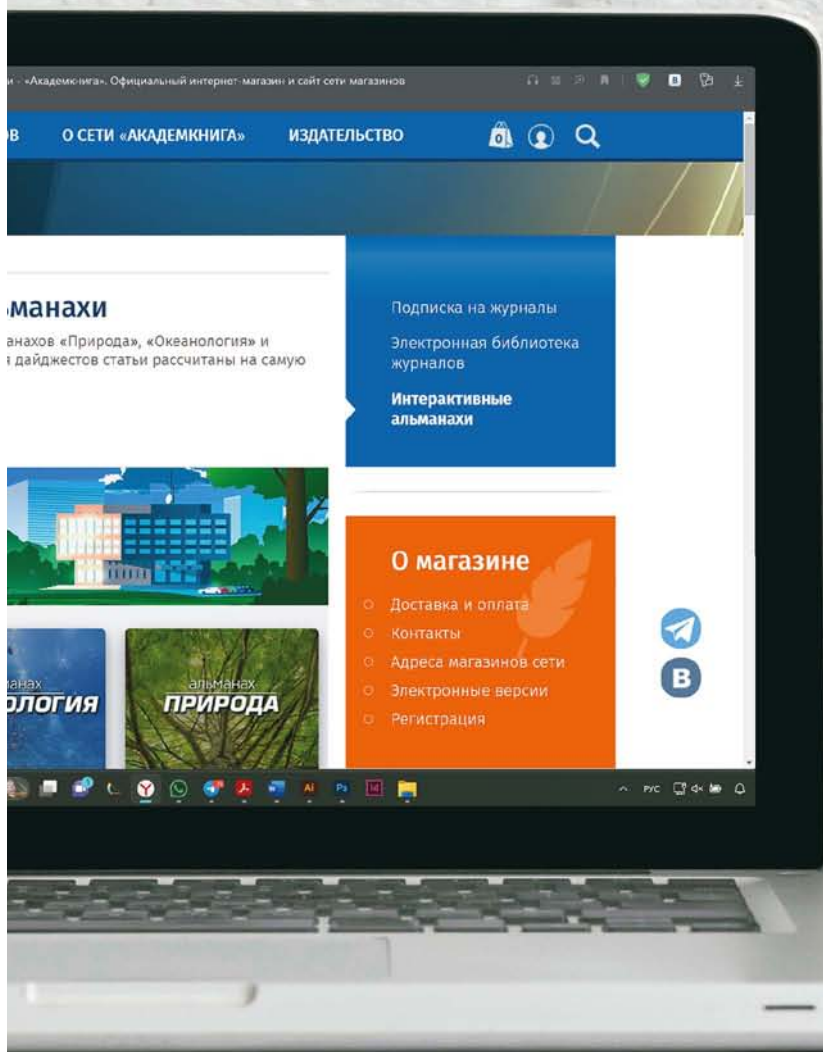
ПОКУПАЙТЕ ДЕШЕВЛЕ В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНЕ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»



КНИГИ



ЖУРНАЛЫ



www.naukabooks.ru



НАУКА
— 1727 —



ИЗДАТЕЛЬСТВО "НАУКА"
121099, г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
тел.: +7 (495) 276-77-35
info@naukapublishers.ru
naukapublishers.ru

ISSN 0044-3948



9 770044 394007